



This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

- + *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
- + *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
- + *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
- + *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at <http://books.google.com/>



Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

- + *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.
- + *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.
- + *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.
- + *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter <http://books.google.com> durchsuchen.

Math 3608.87.2



SCIENCE CENTER LIBRARY

FROM THE REQUEST OF

HORACE APPLETON HAVEN,
OF PORTSMOUTH, N. H.

(Class of 1842.)

26 July, 1887.



0

THEORIE

DER

ANALYTISCHEN FUNCTIONEN

VON

DR. OTTO BIERMANN,
PRIVATDOCENT AN DER DEUTSCHEN UNIVERSITÄT IN PRAG.

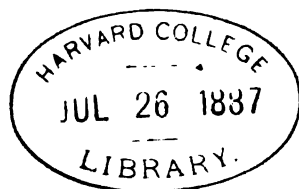


LEIPZIG, ·

DRUCK UND VERLAG VON B. G. TEUBNER.

1887.

~~VI, 417P~~
Math 3608.87.2



W. Allen fund.

Vorrede.

Es ist ein vielfach fühlbarer Mangel, daß heute, wo die von Herrn Professor Dr. Weierstrass neu begründete Theorie der durch ein System in einander fortsetzbarer Potenzreihen definirten sogenannten analytischen Functionen bereits eine mannigfache Verwerthung findet, kein Lehrbuch existirt, welches dem Studirenden methodisch zeigt, auf welche Weise der Functionsbegriff entwickelt wird und welches die allgemeinen Aufgaben der auf die Theorie der Potenzreihen gestützten Functionenlehre sind.

Diesem Mangel hoffe ich durch das vorliegende Buch abzuhelpen, das bei dem Studium der fundamentalen Untersuchungen des Herrn Weierstrass über die analytischen Functionen und bei der Beschäftigung mit den Arbeiten entstanden ist, in welchen Weierstrass' Schüler des Meisters Behandlung der Functionenlehre erkennen lassen. Mit meines hochverehrten Lehrers Weierstrass Erlaubnis, dem der Plan der vorliegenden Arbeit bekannt ist, durfte ich das Buch durch einige seiner nur aus den Vorlesungen bekannten Untersuchungen zieren, wofür ich ihm auch an dieser Stelle meinen grössten Dank auszusprechen als erste Pflicht erachte.

Meine Aufgabe lag in einer passenden Auswahl und Anordnung des umfangreichen Stoffes, bei der ich mich von dem Bestreben leiten liefs, den Leser auch auf kürzlich betretene Wege zu führen und dadurch zu selbstständigem Studium anzuregen, indem ich selbst Fragen berührte, die einer Beantwortung noch harren müssen. Die Darstellung möge durch folgende Bemerkungen gekennzeichnet werden.

Für den Plan war vor Allem die von Sig. Pincherle*) veröffentlichte Einleitung der Weierstrass'schen Functionenlehre maßgebend und im Speciellen bestimmte diese Arbeit die Anordnung der ersten drei Capitel, in deren erstem die Grundlagen der Arithmetik auseinander-gesetzt sind. Mit Hilfe der von H. Kossak**) herausgegebenen „Ele-

*) Pincherle, Giornale di matematiche t. 18.

**) Programmatik des Werderschen Gymnasiums in Berlin (Verlag von Nicolai).

mente der Arithmetik“ war es mir möglich, die noch nirgends ausführlich behandelte Weierstrass'sche Definitionsform der irrationalen Zahlengrößen zu Grunde zu legen. Doch daneben liefs ich die Cantor'sche Definitionsform dieser Größen nicht außer Acht, denn ich wollte den Begriff der Fundamentalreihe nicht entbehren. Die Einführung der aus zwei bei der Addition von einander unabhängigen Elemente zusammengesetzten Zahlengrößen basirte ich auf die von Weierstrass in den Göttinger Nachrichten vom Jahr 1884 veröffentlichte Abhandlung über die aus n Haupteinheiten gebildeten complexen Größen.

In dem zweiten Capitel ist der Begriff der unbeschränkt veränderlichen Größe und eine Reihe von Theoremen über die stetig veränderlichen Größen und Größensmengen auseinandergesetzt. Darauf folgt die Theorie der rationalen ganzen und gebrochenen Functionen einer und mehrerer Variablen, deren vorzüglichste Probleme in der Verallgemeinerung der in der Lehre von den ganzen Zahlen bestehenden Theoreme über die Theilbarkeit und Zerlegung enthalten sind.

Dann wird das bei der Einführung der irrationalen Zahlengrößen verwendete Princip der Summenbildung einer unendlichen Menge von Größen zur Construction neuer Ausdrücke und zwar von Summen unendlich vieler rationaler Functionen benutzt, unter denen die Potenzreihen eine hervorragende Rolle spielen, indem die Summen einer unbeschränkten Anzahl rationaler Functionen in den Bereichen ihrer gleichmäßigen Convergenz durch Potenzreihen darstellbar sind.

An die Theorie der Potenzreihen wird der Begriff der monogenen analytischen Function geknüpft und deren allgemeine Eigenschaften entwickelt. Um aber den Umfang des aufgestellten Functionsbegriffes zu beurtheilen, hat man zunächst zu zeigen, daß die durch einen mit Hilfe der elementaren Rechnungsoperationen zwischen Constanten und veränderlichen Größen ausdrückbaren Zusammenhang definirten Größen unter den Begriff der analytischen Function fallen. Diese in dem 4. Capitel behandelte Aufgabe fand natürlicher Weise keine vollständige Erledigung, aber an dem Beispiel einer in y algebraischen Gleichung, deren Coefficienten rationale Functionen von x sind, wird gezeigt, wie man die durch die Gleichung definirte Größe y in der Umgebung jeder Stelle darstellen kann.

Zum Beweise dafür, daß die algebraische Function monogen ist, vollführt man am besten den Übergang zu einem algebraischen Gebilde, welches in der Umgebung einer seiner Stellen durch ein einziges „Functionenelement“ darzustellen ist. Dieser Übergang wird nur principiell entwickelt, da man bei demselben die Untersuchung der rationalen Functionen $R(x, y)$ nöthig hat, deren Behandlung über den gesteckten Rahmen fallen würde. Ebenso wird auch der Begriff des

Ranges oder Geschlechtes einer algebraischen Gleichung nur theoretisch eingeführt. Ich konnte das umsomehr thun, da ich wohl algebraische Gleichungen zwischen eindeutigen transcendenten Functionen abgeleitet und dabei bemerkt habe, daß algebraische Gleichungen verschiedenen Ranges durch eindeutige Functionen einer Variablen zu lösen sind, aber die umgekehrte Frage nach denjenigen Functionen, welche eine vorgegebene algebraische Gleichung lösen, keine Behandlung finden konnte.

In dem ersten Abschnitt des vierten Capitels, der größtentheils den Weierstrass'schen Vorlesungen entnommen ist, wird ferner die Darstellung von n durch n algebraische Gleichungen mit m unabhängigen Variablen definirten Größen behandelt und der Begriff eines analytischen Gebildes m^{ter} Stufe in dem Gebiete von $(n + m)$ Größen entwickelt, doch bleibt die Frage nach der Monogenität des irreduciblen algebraischen Gebildes höherer Stufe noch unberücksichtigt.

In einem zweiten Abschnitte desselben Capitels ist dann gezeigt, daß auch die durch ein System algebraischer totaler oder partieller Differentialgleichungen definirten Größen wiederum nur analytische Functionen sind, wobei die Untersuchungen von Briot und Bouquet und der Frau von Kowalevski*) die Richtschnur bildeten.

Ist auf solche Weise der Umfang des Begriffes der analytischen Function erfaßt, so wird von einer mit einer unabhängigen Variablen veränderlichen Größe, die besondere analytisch ausdrückbare Eigenschaften genießt, von vornherein festgesetzt, daß sie eine analytische Function sein soll. Unter dieser Festsetzung werden die gewissen einfachen Functionalgleichungen genügenden transcendenten Functionen abgeleitet und zwar die Exponentialfunction, der Logarithmus und die allgemeine Potenz, wobei sich Gelegenheit ergab, die trigonometrischen Functionen und deren Umkehrfunctionen zu berücksichtigen.

In dem weiteren Capitel ist das Problem der Ermittlung der arithmetischen Abhängigkeit des Werthes einer eindeutigen Function einer Variablen von dem Werthe der letzteren auseinandergesetzt, wenn für die Function ein Stetigkeitsbereich und das Verhalten der Function an dessen isolirten Grenzstellen vorgegeben ist. Dabei habe ich die Darstellung der ganzen Function durch ein Product von Primfunctionen vorangestellt und dann unter Anwendung des nach Scheeffer's Vorgang bewiesenen Laurent'schen Satzes das Mittag-Leffler'sche Theorem behandelt. Als Anwendungen werden die trigonometrischen Functionen in verschiedenen Formen dargestellt und die Weierstrass'sche ganze transcendente Function $\sigma(x)$ eingeführt. Dann wählte ich von den Untersuchungen des Herrn Mittag-Leffler noch diejenigen aus, welche das Eindringen in die Frage, ob sich „der Begriff

*) Borchardt's Journal für reine und angewandte Mathematik. Bd. 80.

einer monogenen Function einer complexen Veränderlichen mit dem einer durch arithmetische Größenoperationen ausdrückbaren Abhängigkeit vollständig deckt“ oder nicht, ermöglichen.

Das nächste Capitel enthält eine übersichtliche Darstellung der großartigen Theorie der eindeutigen doppeltperiodischen Functionen von Weierstrass, die durch die Arbeiten von W. Biermann, Simon und Müller, Kiepert und neuerdings durch die von Herrn Schwarz veröffentlichten „Formeln und Lehrsätze zum Gebrauche der elliptischen Functionen“ so ziemlich Gemeingut der Mathematiker geworden ist. Ich entwickelte die Grundzüge dieser Theorie, um dem Leser die Fruchtbarkeit der vorangegangenen Lehren klar zu machen und ihm andererseits zu zeigen, was für einen Ausblick diese Theorie gewährt, wenn man Functionen mit linearen Substitutionen in sich betrachten will.

Endlich in dem letzten Capitel werden die von Weierstrass aufgestellten Sätze und Definitionen über die Functionen mehrerer Variabeln vorgetragen, und von den eindeutigen Functionen, die sich überall durch den Quotienten zweier Potenzreihen darstellen lassen, wird gezeigt, daß sie rationale Functionen ihrer Argumente sind. Der letzte Paragraph beschäftigt sich mit dem irreductiblen algebraischen Gebilde m^{ter} Stufe im Gebiete von $(m + 1)$ Größen.

Prag, im Mai 1886.

Der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

Erstes Capitel.

Die Elemente der Arithmetik.

	Seite
§ 1. Begriff der ganzen Zahl. Die directen Rechnungsarten mit ganzen Zahlen	1
§ 2. Erklärung des Theilers und des Vielfachen einer Zahl. Gemeinsamer Theiler, gemeinsames Vielfache zweier Zählen. Primzahlen und zusammengesetzte Zahlen	4
§ 3. Die indirecten Rechnungsarten mit ganzen Zahlen	7
§ 4. Einführung der gebrochenen und negativen Zahlengrößen	8
§ 5. Besondere Darstellung der rationalen Zahlengrößen	16
§ 6. Einführung der irrationalen Größen	19
§ 7. Zweite Definitionsform der irrationalen Zahlengrößen	33
§ 8. Aus mehreren Haupteinheiten zusammengesetzte Größen.	40
§ 9. Graphische Darstellung der Zahlengrößen	49
§ 10. Summen unendlich vieler complexer Größen.	53
§ 11. Producte unendlich vieler Factoren	55

Zweites Capitel.

I. Abschnitt.

Veränderliche Größen, Größenmengen.

§ 12. Definition der algebraischen rationalen ganzen und gebrochenen Ausdrücke	64
§ 13. Unbeschränkt veränderliche Größen	65
§ 14. Häufungsstelle linearer Punktmengen	70
§ 15. Abgeleitete Punktmengen	73
§ 16. Obere und untere Grenze unendlich vieler reeller Zahlengrößen	76
§ 17. Von reellen Variablen abhängige stetig veränderliche Größen	78

II. Abschnitt.

Rationale ganze und gebrochene Functionen einer und mehrerer Variablen.

§ 18. Rationale ganze Functionen einer Variablen	85
§ 19. Größter gemeinsamer Theiler zweier ganzer Functionen einer Variablen	98
§ 20. Fortsetzung	100

	Seite
§ 21. Ganze rationale Functionen mehrerer unabhängiger Variabeln	105
§ 22. Gemeinsamer Theiler zweier ganzer Functionen mehrerer Variabeln	111
§ 23. Rationale gebrochene Functionen	114
§ 24. Lagrange'sche Interpolationsformel. Summen gleicher Potenzen der Wurzeln einer Gleichung.	118
§ 25. Darstellung der rationalen gebrochenen Function einer Variabeln durch Partialbrüche	123

Drittes Capitel.

I. Abschnitt.

Potenzreihen einer und mehrerer Variabeln.

§ 26. Gleichmäßige Convergenz	130
§ 27. Potenzreihen	135
§ 28. Der wahre Convergenzradius einer Potenzreihe einer Variabeln.	138
§ 29. Ein Satz über die Coefficienten der Potenzreihen	141
§ 30. Summen unendlich vieler Potenzreihen	145
§ 31. Die abgeleitete Potenzreihe.	157
§ 32. Beziehung zwischen den aus einer ersten Reihe abgeleiteten Reihen. Obere und untere Grenze der Convergenzradien der abgeleiteten Reihen	161

II. Abschnitt.

Begriff der monogenen analytischen Function. Allgemeine Eigenschaften der analytischen Function einer Variabeln.

§ 33. Definition der monogenen analytischen Function.	169
§ 34. Allgemeine Betrachtungen über die eindeutigen analytischen Functionen	172
§ 35. Endlich vieldeutige analytische Functionen	183

Viertes Capitel.

Über den Umfang des Begriffes der analytischen Function.

I. Abschnitt.

Theorie der algebraischen Gleichungen.

§ 36. Einleitung	191
§ 37. Darstellung der Wurzeln einer algebraischen Gleichung	198
§ 38. Darstellung des algebraischen Gebildes	205
§ 39. Fortsetzung	211
§ 40. Transformation algebraischer Gleichungen.	224
§ 41. Beweis für die Monogenität der algebraischen Function	229
§ 42. Systeme algebraischer Gleichungen. Das analytische Gebilde m^{ter} Stufe im Gebiete von $(m + n)$ Größen	232

II. Abschnitt.

Durch Differentialgleichungen definierte analytische Functionen.

§ 43. Totale Differentialgleichungen.	244
§ 44. Partielle Differentialgleichungen.	253

Fünftes Capitel.**Ableitung der elementaren transcendenten Functionen einer Variablen.**

§ 45. Die Exponentialfunction	264
§ 46. Aus der Exponentialfunction rational zusammengesetzte Functionen	269
§ 47. Logarithmus	283
§ 48. Die allgemeine Potenz	289
§ 49. Der Cosinus und Sinus ganzzahliger Vielfacher des Argumentes	297
Anhang	300

Sechstes Capitel.**Darstellung der eindeutigen analytischen Functionen einer Veränderlichen.**

§ 50. Einleitung. Darstellung der ganzen transcendenten Function durch Producte. Darstellung jeder Function mit einer wesentlich singulären Stelle	303
§ 51. Fortsetzung. Darstellung der trigonometrischen Functionen	317
§ 52. Die Weierstrass'sche σ -Function	332
§ 53. Der Laurent'sche Satz	340
§ 54. Das Mittag-Leffler'sche Theorem	344
§ 55. Erweiterung des Mittag-Leffler'schen Theorems	353
§ 56. Arithmetische Ausdrücke, die mehrere Functionen ganz oder theilweise darstellen	359
§ 57. Darstellung eindeutiger Functionen durch Producte	362

Siebentes Capitel.**I. Abschnitt.****Doppeltperiodische Functionen.**

§ 58. Allgemeine Eigenschaften der doppeltperiodischen Functionen, die im Endlichen den Charakter rationaler Functionen besitzen	367
§ 59. Neue Definition der doppeltperiodischen Function $p(u)$. Darstellung jeder doppeltperiodischen Function durch $p(u)$ und die Ableitungen dieser Function.	376
§ 60. Gleichung zwischen $p(u)$ und $p'(u)$	382
§ 61. Differentialgleichung für die doppeltperiodische Function zweiten Grades	385
§ 62. Additionstheorem der doppeltperiodischen Functionen	389
§ 63. Berechnung primitiver Perioden.	394
§ 64. Eindeutige Functionen des Periodenverhältnisses	403

II. Abschnitt.**Einleitung in die Theorie der Functionen mit linearen Substitutionen in sich.**

§ 65. Normalformen der Substitutionen. Functionen mit einer Fundamentalsubstitution	409
§ 66. Functionen mit zwei vertauschbaren Substitutionen	416
§ 67. Functionen mit einer endlichen Anzahl von Fundamentalsubstitutionen	418

Achtes Capitel.**Analytische Functionen mehrerer Variabeln.**

§ 68. Das Verhalten einer analytischen Function in der Umgebung einer Nullstelle	428
§ 69. Der Quotient zweier Potenzreihen.	434
§ 70. Über die Darstellung der eindeutigen analytischen Functionen. . . .	441
§ 71. Das irreductible algebraische Gebilde n^{ter} Stufe im Gebiete von $n+1$ Größen	446

Erstes Capitel.

Die Elemente der Arithmetik.

§ 1. Begriff der ganzen Zahl. Die directen Rechnungsarten mit ganzen Zahlen.

Indem wir uns der Wiederholung ein und derselben geistigen Thätigkeit an Dingen der sinnlichen Wahrnehmung bewußt werden, gelangen wir zu dem Begriff der *Menge*. Besteht ein Gegenstand aus Bestandtheilen oder Elementen von gemeinsamen Merkmalen, auf daß bei der Beschreibung des Gegenstandes ein Element für ein anderes zu setzen ist, und abstrahiren wir von den gleichen Merkmalen der Bestandtheile, *so besitzen wir die Vorstellung der Vielheit oder Menge gleichartiger Elemente durch die Zahl.*

Der Begriff der Zahl wird durch die Zusammensetzung von Gegenständen aus gleichartigen Bestandtheilen gegeben und ist geradezu *als die Vorstellung der Vielheit gleichartiger Bestandtheile zu definiren.**)

Indem man jedes der gleichartigen Elemente durch den Ausdruck Eins bezeichnet, besteht *das Zählen der Elemente oder Einheiten* der Menge in der Fixirung von Eins und Eins — und Eins usw. durch neue Ausdrücke zwei, drei usw. Die Zahl ist die Vorstellung der durch diese Ausdrücke bezeichneten Gruppen von Elementen.

Die wiederholte Setzung und Vereinigung der zu Grunde gelegten gleichartigen Elemente liefert die *Zahlenreihe*, und in dieser ist jede Zahl aus der nächst vorhergehenden durch Hinzufügung von Eins gebildet.

Zwei aus einem unbestimmt gelassenen Grundelemente e oder der abstracten Einheit 1 zusammengesetzte Zahlen a und b sind gleich ($a = b$), wenn zu jedem Element der einen Zahl ein Element der andern gehört, und *ungleich*, wenn bei der Gegenüberstellung der Elementenreihen in der einen Elemente vorkommen, denen in der andern keine entsprechen. Die Zahl, welche mehr Elemente enthält,

*) Weierstraß (siehe die Elemente der Arithmetik von Kossak).

heißt die *größere*, die andere die *kleinere*. Dieses gegenseitige Verhältnis bezeichnet man durch $a > b$, $b < a$, wenn a die größere Zahl ist. Mit $a = b$ gilt $b = a$, mit $a = b$ und $b = c$ wird $a = c$, und endlich folgt aus

$$a > b \text{ und } b > c, \quad a > c.$$

Will man die Vorstellung von der Zusammensetzung eines aus verschiedenartigen Elementen bestehenden Gegenstandes gewinnen, so muß man angeben, welche Arten von Elementen und wie viele Elemente der angegebenen Art vorkommen. Die zusammengesetzte Vorstellung der einzelnen Gruppen gleichartiger Elemente ist die „*zusammengesetzte Zahl oder Zahlengröße*“. Man sagt „Zahlengröße“ darum, weil die neue Zahl anders ausfällt, wenn man Elemente hinzufügt oder wegnimmt.

Zwei complexe Zahlen sind wieder *gleich*, wenn sie dieselben Elemente in gleicher Anzahl enthalten.

Wir betrachten vor allem die aus gleichen Elementen gebildeten Zahlen, welche *ganze Zahlen* genannt werden, und nehmen einfache Verknüpfungen mit ihnen vor, zu denen ursprünglich erfahrungsgemäß festgestellte Eigenschaften von Dingen der Sinnenwelt die Veranlassung gegeben haben werden.

Wir bilden eine Zahl, die alle Elemente zweier aus demselben Grundelement zusammengesetzten Zahlen a und b enthält.)*

Diese stets ausführbare Operation heißt *Addition* und besteht in der Vereinigung sämtlicher Elemente beider Zahlen zu einer. Bezeichnet man die gewonnene Zahl mit $a + b$, so ist offenbar

$$a + b = b + a$$

und ebenso

$$\begin{aligned} a + b + c &= a + c + b = b + a + c \\ &= b + c + a = c + a + b = c + b + a \end{aligned}$$

d. h. das Resultat der Vereinigung oder „*die Summe*“ ist unabhängig von der Folge, in welcher die Summanden a, b, c verbunden werden. Neben diesem „*commutativen*“ Verknüpfungsgesetz besteht das in der Gleichung

$$a + (b + c) = (a + b) + c$$

ausgesprochene, welches besagt, daß die Summe auch von der Vereinigung der Summanden in Theilsummen unabhängig ist. Dieses Gesetz heißt das *associative*.

In der Summe kann man ferner jeden Summanden durch eine diesem gleiche Zahl ersetzen.

*) Soll das Grundelement e , aus dem eine Zahl im Gegensatz zu der aus der Einheit gebildeten Zahl a zusammengesetzt ist, besonders kenntlich gemacht sein, so schreiben wir statt a ae .

Setzt man an Stelle jedes der Elemente einer Zahl b die Zahl a , so entsteht die Summe

$$a + a + \dots + a \text{ (} b \text{ mal),}$$

die man kurz mit $a \cdot b$ oder kurz ab bezeichnet. Die Operation, durch welche ab (sprich a mal b) gebildet ist, nennt man *Multiplication*; ab heisst das *Product der Factoren* a und b , a der *Multiplicandus*, b der *Multiplicator*.

Wir bemerken, dafs das Product aus a ebenso zusammengesetzt ist, wie b aus der Einheit oder dem Grundelement, so dafs man sagen kann:

Eine Zahl mit einer andern multipliciren heisst, eine dritte Zahl so aus dem Multiplicandus bilden, wie der Multiplicator aus der Einheit gebildet ist.

Indem die Multiplication hier aus der wiederholten Addition hervorgeht, ist sie nicht als selbständige Rechnungsart anzusehen, und wir werden sie erst später als eine von der Addition verschiedene Verknüpfungsweise betrachten müssen.

Man kann in

$$a + a + \dots + a \text{ (} b \text{ mal)}$$

aus jeder Gruppe von a Elementen eines herausnehmen und deren Vereinigung gibt b . Dieser Vorgang ist a mal möglich; die Vereinigung gibt

$$b + b + \dots + b \text{ (} a \text{ mal)} = ba,$$

und es ist

$$ab = ba. \quad (1)$$

Bilden wir die Summe der folgenden b Horizontalreihen, deren jede die Zahl c a mal enthält,

$$c, c \dots c$$

$$c, c \dots c$$

$$\dots \dots \dots$$

$$c, c \dots c$$

und andererseits die Summe der a Verticalreihen, deren jede die Zahl c b mal enthält, so folgt das Multiplicationsgesetz:

$$(ca) \cdot b = (cb) \cdot a,$$

und weil die Zahl c ab mal als Summand vorkommt, ist ferner

$$(ca) \cdot b = (cb) a = c(ab), * \quad (2)$$

d. h. das Resultat der Multiplication ist unabhängig von der Folge der Factoren und unabhängig von der Zusammensetzung der Factoren in Theilproducte.

*) Vergl. Dirichlet's Zahlentheorie.

Addirt man c Gruppen $(a + b)$, so folgt das dritte „distributive“ Multiplicationsgesetz

$$(a + b)c = ac + bc, \quad (3)$$

indem

$$\begin{aligned} (a + b)c &= (a + b) + (a + b) + \cdots + (a + b) \text{ (c mal)} \\ &= (a + a + \cdots + a \text{ [c mal]}) + (b + b + \cdots + b \text{ [c mal]}) \end{aligned}$$

ist.

Als Folge dieser Gesetze geht für das Product zweier Summen

$$\begin{aligned} a &= a_1 + a_2 + \cdots + a_m, & b &= b_1 + b_2 + \cdots + b_n \\ ab &= a_1 b_1 + a_2 b_1 + \cdots + a_m b_1 \\ &\quad + a_1 b_2 + a_2 b_2 + \cdots + a_m b_2 \\ &\quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ &\quad + a_1 b_n + a_2 b_n + \cdots + a_m b_n \end{aligned}$$

hervor.

Das Product von n einander gleichen Zahlen a nennt man die n^{te} Potenz von a und bezeichnet

$$a \cdot a \cdot \cdots \cdot a \text{ (n mal) mit } a^n.$$

Die Zahl n heisst der Exponent der Potenz und a deren Basis.

Aus der Definition folgen unmittelbar die Eigenschaften

$$a^m \cdot a^n = a^{m+n}, \quad a^m b^m = (ab)^m, \quad a^{mn} = (a^m)^n.$$

§ 2. Erklärung des Theilers und des Vielfachen einer Zahl.

Gemeinsamer Theiler, gemeinsames Vielfache zweier Zahlen.

Primzahlen und zusammengesetzte Zahlen.

Ist eine Zahl c das Product aus der Zahl a und einer zweiten Zahl n , so heisst c ein *Vielfaches* von a und a ein *Theiler* von c .

Aus dieser Definition gehen die Sätze hervor:

- 1) Ist c ein Vielfaches von a , a ein Vielfaches von b , so ist auch c ein Multiplum von b .
- 2) Ist in einer Reihe von Zahlen jede ein Vielfaches der nächstfolgenden, so ist jede frühere ein Vielfaches jeder späteren.
- 3) Ist sowohl a als auch b ein Vielfaches von c , so ist auch die Summe $a + b$ ein Vielfaches von c .

Man kann nun die Frage nach den *gemeinsamen Theilern* zweier Zahlen a und b , von denen etwa a die grössere sei, aufwerfen und speciell den *größten gemeinsamen Theiler* verlangen.

Man zerlege a in $b + b + \cdots + b + c$, wo $c < b$ ist, b ebenso in $c + c + \cdots + c + d$, wo $d < c$ ist usw., so entsteht eine Folge von Gleichungen der Gestalt:

$$a = n_1 b + c, \quad (c < b)$$

$$b = n_2 c + d, \quad (d < c)$$

$$\vdots$$

$$f = n_{m-1} g + h \quad (h < g)$$

$$g = n_m h,$$

wo $n_1, n_2 \dots n_m$ ganze Zahlen bedeuten.

Man wird, wie hier angezeigt ist, bei dem beschriebenen Fortgang endlich eine Zahl f in ein Vielfaches einer Zahl g und einen „Rest“ h zu zerlegen haben, der selbst Theiler von g ist. Der Proceß muß einen Abschluß haben, da es nur eine beschränkte Anzahl von Zahlen gibt, die kleiner sind als b . Die Zahl h ist aber (nach dem Satze 3) auch Theiler von f und allen voranstehenden Zahlen, endlich auch von b und a .

Den Satz 3) können wir folgendermaßen umkehren: Eine durch m theilbare Zahl c läßt sich nur so in eine Summe zweier Summanden, deren einer durch m theilbar ist, zerlegen, daß auch der zweite diesen Theiler besitzt. Dann aber ergibt die Betrachtung unserer Gleichungen, daß jeder gemeinsame Theiler von a und b auch ein Vielfaches von h ist, und *darum ist h der größte gemeinsame Theiler von a und b .*

Ist in der Folge von Gleichungen schließlic h gleich Eins, so haben a und b nur den selbstverständlichen gemeinsamen Theiler Eins. Indem man von diesem absieht, nennt man solche Zahlen: *Zahlen ohne gemeinsamen Theiler oder relative Primzahlen.*

Von diesen Zahlen gilt zunächst der Satz:

„Sind a und b relative Primzahlen, und ist k eine beliebige dritte Zahl, so ist jeder gemeinsame Theiler von ak und b auch Theiler von k und b .“

In der That, multiplicirt man in den früheren Gleichungen, wo wir $h=1$ setzen, die rechten und linken Seiten mit k , so erhält man die Gleichungen

$$ak = n_1 bk + ck$$

$$bk = n_2 ck + dk$$

$$\vdots$$

$$fk = n_{m-1} gk + k$$

$$gk = n_m k,$$

weil ja mit $A = B$ auch $Ak = Bk$ ist, und an diesen Relationen ist die Behauptung leicht bestätigt. Jeder Theiler von ak und b ist auch Theiler von $n_1 bk$ und ck , dann von $n_2 ck$ und dk usw., endlich von fk , gk und k .

Mit diesem Satze sind die folgenden bewiesen:

- 1) Sind die Factoren eines Productes ak relative Primzahlen gegenüber b , so sind ak und b relativ prim.

- 2) Sind a und b relative Primzahlen, hat aber ak den Theiler b , so ist k durch b theilbar.
- 3) Ist jede Zahl einer Reihe von Zahlen relativ prim gegen jede Zahl einer zweiten Reihe, so ist auch das Product aller Zahlen der ersten Reihe relativ prim gegen das Product aller Zahlen der zweiten Reihe, und speciell sind die Potenzen relativ primärer Zahlen wieder Zahlen ohne gemeinsamen Theiler.

Wir können auch die *gemeinsamen Vielfachen* zweier Zahlen, d.h. die Zahlen, welche durch a und b theilbar sind und speciell das *kleinste gemeinschaftliche Vielfache* angeben, dessen Vielfache die übrigen Multipla von a und b sind. Ist

$$a = ma', \quad b = mb'$$

und sind a' und b' relativ prim, so hat jedes Vielfache von a und b die Gestalt

$$n \cdot ma'b'$$

und das kleinste ist $ma'b'$.

Nennt man eine Zahl p *Primzahl*, wenn sie nur die Einheit und sich selbst zum Theiler hat, und bringt man p mit einer andern Zahl a in Vergleich, so ist p entweder Theiler von a , oder p und a sind relativ prim. Die Zahl p muß ebenso Theiler eines Factors des Productes $a \cdot b \dots$ sein, wenn das Product und die Primzahl nicht relativ prim sind. Auf diesen Eigenschaften der Primzahl beruht der folgende Satz:

Jede Zahl a , die nicht selbst eine Primzahl ist, läßt sich immer nur auf eine Weise in ein Product von Primzahlen zerlegen.

Die Zerlegung einer Zahl a in das Product von Theilern $a_1, a_2 \dots$ muß nämlich zu einem Abschluß führen, da diese Theiler immer kleiner werden und nur eine beschränkte Anzahl von Zahlen existirt, die kleiner sind als a ; der letzte kleinste Theiler a_n ist eine Primzahl p_1 , und es wird $a = p_1 k_1$. Durch denselben Vorgang findet man für k_1 eine Zerlegung $k_1 = p_2 k_2$ usw., endlich ist

$$a = p_1 p_2 p_3 \dots p_n.$$

Eine zweite Zerlegung in ein Product von Primzahlen

$$q_1 q_2 q_3 \dots q_m$$

kann es nicht geben, denn andernfalls müßte das Product $p_1 p_2 p_3 \dots p_n$ und in diesem ein Factor z. B. p_1 durch q_1 theilbar sein, doch weil p_1 eine Primzahl ist, folgt $p_1 = q_1$, und ebenso ist etwa $p_2 = q_2$ usw. Es folgt die vollständige Übereinstimmung und der Satz ist bewiesen.

Mit Hilfe der Zerlegung der aus Primzahlen *zusammengesetzten* Zahlen in ihre Primfactoren gewinnt man eine neue Lösung der Auf-

gabe: den grössten gemeinsamen Theiler zweier Zahlen zu bestimmen. Sind diese Zahlen

$$a = p_1^{n_1} p_2^{n_2} \dots p_m^{n_m}, \quad b = q_1^{r_1} q_2^{r_2} \dots q_k^{r_k},$$

so ist der grösste gemeinsame Theiler das Product der in a und b zugleich vorkommenden Primzahlen, jede in der niedrigen Potenz genommen.

Das kleinste gemeinsame Vielfache ist das Product aller in a und b vorkommenden Primzahlen, jede in der höher auftretenden Potenz genommen.

All die Sätze von Theilern und Vielfachen ganzer Zahlen werden später in der Theorie der ganzen Functionen in gleicher Form wieder auftreten.

§ 3. Die indirecten Rechnungsarten mit ganzen Zahlen.

Wir wenden uns zu den der Addition und Multiplication *inversen Rechnungsarten*.

Eine Zahl b von einer Zahl a *subtrahiren* heisst: *Diejenige Zahl finden, welche zu b addirt a ergibt.* Die Zahl a heisst der *Minuend*, b der *Subtrahend* und die gesuchte Zahl, wenn eine solche existirt, die *Differenz* von a und b . Man bezeichnet dieselbe mit $a - b$.]

Der Definition zufolge ist

$$(a - b) + b = a.$$

Die neue Operation, die *Subtraction*, ist eindeutig, denn aus der Annahme, daſs sowohl

$$\alpha + b = a, \text{ als auch } \beta + b = a$$

ist, folgt

$$\alpha + b = \beta + b,$$

und die Vergleichung der $\alpha + b$ und $\beta + b$ zugehörigen Elementenreihen führt auf $\alpha = \beta$.

Die Subtraction ist aber nur ausführbar, wenn der Minuend gröſser ist als der Subtrahend.

Die Eigenschaften der Differenz folgen aus der Definition. Es ist

$$a + (b - c) + c = a + b,$$

d. h. $a + (b - c)$ ist diejenige Zahl, welche zu c addirt $a + b$ ergibt, also wird

$$a + (b - c) = a + b - c.$$

Setzt man $c = b$, so ist

$$a + (b - b) = a + b - b.$$

Da aber

$$((a - b) + b) + b = a + b,$$

$$(a - b) + b = a + b - b$$

ist, folgt

$$a + (b - b) = (a - b) + b = a.$$

Die GröÙe $(b - b)$ zu a hinzugefügt läÙt a ungeändert. Wir bezeichnen sie mit dem Zeichen 0 und dem Ausdruck *Null*. Besagt a , daÙ das Grundelement a mal vorkommt, so sagt das Zeichen 0, daÙ das Element nicht vorkommt.

Man findet auch leicht die in den folgenden Gleichungen niedergelegten Eigenschaften der Differenz bestätigt:

$$\begin{aligned} a - (b - c) &= a + c - b \\ (a + c) - (b + c) &= a - b \\ (a - c) - (b - c) &= a - b. \end{aligned}$$

Die inverse Operation der Multiplication ist die *Division*.

Eine Zahl a durch eine Zahl b dividiren heiÙt diejenige Zahl c bestimmen, welche mit b multiplicirt a gibt.

Man nennt c den *Quotienten* aus dem *Dividend* a und dem *Divisor* b , und bezeichnet

$$c = \frac{a}{b} = a : b.$$

Nach der Definition ist

$$\frac{a}{b} b = a.$$

Die neue Operation ist nur lösbar, wenn der Dividend ein Vielfaches des Divisors ist, aber dann in eindeutiger Weise, denn aus der Annahme

$$a = \alpha b = \beta b$$

folgt

$$\alpha = \beta.$$

Für den Quotienten gelten zufolge der Definition die Eigenschaften

$$\frac{am}{bm} = \frac{a}{b}, \quad \frac{\frac{a}{m}}{\frac{b}{m}} = \frac{a}{b}, \quad \frac{a}{b} m = \frac{am}{b} = \frac{m}{b} a,$$

und ferner bleibt die aus einem Grundelement e gebildete Zahl a bei der Division durch e ungeändert.

Der Quotient heiÙt auch *Bruch*, der Dividend und Divisor auch *Zähler* und *Nenner*. Ist in dem Bruche $\frac{a}{b}$ $a > b$, so nennt man den Bruch *unecht*, andernfalls *echt*.

§ 4. Einführung der gebrochenen und negativen ZahlengröÙen.

Soll die Division unabhängig davon, ob der Dividend a ein Vielfaches des Divisors b ist oder nicht, ausführbar sein, so muÙ man ein neues mit Hilfe der ganzen Zahlen zu definirendes Ding, eine neue GröÙe einführen.

Wir nehmen zu jedem einzelnen Elemente, aus denen die ganzen Zahlen gebildet sind, neue hinzu, so daß zwei, drei neue Elemente usw. jenes eine vertreten. Bezeichnet man ein Element ε_n , deren n das Grundelement e oder sagen wir hier kurzweg die Einheit $e = 1$ ersetzen, mit $\frac{1}{n}$, so ist

$$n \varepsilon_n = \frac{1}{n} + \frac{1}{n} + \dots + \frac{1}{n} (n \text{ mal}) = 1.$$

Die Größe, deren n die Zahl a vertreten, sei mit $\frac{a}{n} = a\varepsilon_n$ bezeichnet, dann ist

$$\frac{a}{n} + \frac{a}{n} + \dots + \frac{a}{n} (n \text{ mal}) = a.$$

Es entsteht zunächst die Frage, wie sich die neu definierten Größen, die aus der Einheit und einer angebbaren (endlichen) Anzahl von „Bruchtheilen“ ε_n der Einheit zusammengesetzt sind, auf daß sie die allgemeine Form

$$a_0 + a_1 \varepsilon_{n_1} + a_2 \varepsilon_{n_2} + \dots + a_m \varepsilon_{n_m}$$

annehmen, die für die ganzen Zahlen aufgestellten Rechnungsoperationen gestalten. Vor der Beantwortung dieser Frage setzen wir aber fest, daß die neuen Größen den für die ganzen Zahlen giltigen Verknüpfungsregeln Folge leisten sollen. Diese Festsetzung ist gewiß zulässig, wenn die Anwendung der genannten Regeln auf die neuen Größen keinen Widerspruch zu Tage fördert.

Beachten wir, daß der Definition gemäß

$$m_n \varepsilon_{m_n} = 1$$

ist, oder die Gleichung

$$\left. \begin{array}{c} \varepsilon_{m\pi} + \varepsilon_{m\pi} + \dots + \varepsilon_{m\pi} (m \text{ mal}) \\ + \varepsilon_{m\pi} + \varepsilon_{m\pi} + \dots + \varepsilon_{m\pi} (m \text{ mal}) \\ \vdots \\ n(m \text{ mal}) \end{array} \right\} = 1$$

besteht, so gibt die Anwendung der Additionsgesetze unmittelbar die Gleichungen:

$$(m \varepsilon_{m n}) n = 1 \quad \text{oder} \quad m \varepsilon_{m n} = \varepsilon_n,$$

$$(n\varepsilon_{mn})m = 1 \quad \text{oder} \quad n\varepsilon_{mn} = \varepsilon_m.$$

Darnach kann man jede gebrochene Zahlengrösse

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon_{\pi_1} + \dots + \alpha_m \varepsilon_{\pi_m}$$

derart transformiren, daß sie nur Elemente ε_n einer Art enthält. In der That ist n ein gemeinsames Vielfache der Zahlen $n_1, n_2 \dots n_m$, so zwar daß

$$n_1 v_1 = n_2 v_2 = \dots = n_m v_m = n$$

ist, so wird

$$\varepsilon_{n_\mu} = v_\mu \varepsilon_{n_\mu} v_\mu = v_\mu \varepsilon_n \quad (\mu = 1, 2 \dots m),$$

und wenn man für $a_0 a_0 n \varepsilon_n$ schreibt, folgt die Darstellung

$$a = (a_0 n + a_1 v_1 + \dots + a_m v_m) \varepsilon_n,$$

wobei das dritte Multiplicationsgesetz ganzer Zahlen verwendet wurde.

Zwei Zahlengrößen der neuen Art sind gleich, wenn sie so umgeformt werden können, daß beide dieselben Elemente und jedes in gleicher Anzahl enthalten.

Will man also zwei Zahlengrößen a und b vergleichen, so drücke man beide durch dasselbe Element ε_n aus und vergleiche die Anzahl dieser Elemente. Da man jedoch eine unbeschränkte Anzahl gemeinsamer Elemente ε_n wird angeben können, in denen sich a und b darstellen lassen, so muß man nachsehen, ob die einmal als gleich befundenen Zahlengrößen bei anderer Vergleichungsart gleich bleiben.

Angenommen a und b seien in der Form $a_1 \varepsilon_m, b_1 \varepsilon_n$ gegeben, m und n hätten das kleinste gemeinschaftliche Vielfache r , und a und b erhielten in den Elementen ε_r die Gestalt $a_2 \varepsilon_r$ und $b_2 \varepsilon_r$, so sind sie gleich, wenn $a_2 = b_2$ ist. Da jede weitere Darstellung in denselben Elementen die Form

$$a_2 k \varepsilon_{rk}, \quad b_2 k \varepsilon_{rk}$$

annimmt, so sind die ursprünglichen Zahlengrößen auch gleich, wenn $a_2 k = b_2 k$ ist. Weil dann $a_2 = b_2$ sein muß, schließen wir, daß die Art der Vergleichung keinen Unterschied im Resultate hervorbringt.

Wir ersehen aber auch, daß die neuen Zahlengrößen die folgenden nothwendigen Forderungen erfüllen:

mit $a = b$ ist auch $b = a$,

mit $a = b$ und $b = c$ wird $a = c$ und

mit $a > b, b > c$ wird $a > c$.

Die *Addition der neuen Zahlengrößen* besteht jetzt darin, daß man sämtliche Elemente der Summanden zu einer Zahlengröße vereinigt. In der Summe $(a + b)$, die zufolge des Gleichheitsbegriffes von der Anordnung der Summanden unabhängig ist, kann man a und b durch jede gleichwerthige Zahlengröße a' und b' ersetzen, ohne den Werth der Summe zu ändern, und darum kann man die Summanden in demselben Elemente ε_n darstellen und die Anzahl dieser vereinigen.

Das *Product zweier Zahlengrößen* a und b soll den Multiplicationsgesetzen ganzer Zahlen genügen, daher muß das Product

$$(\varepsilon_m + \varepsilon_m + \dots m \text{ mal}) \cdot (\varepsilon_n + \varepsilon_n + \dots n \text{ mal}) = m n (\varepsilon_m \varepsilon_n)$$

sein, und weil

$$m \varepsilon_m = 1, \quad n \varepsilon_n = 1, \quad m n \varepsilon_{mn} = 1$$

ist, folgt

$$m n (\varepsilon_m \varepsilon_n) = (m \varepsilon_m) \cdot (n \varepsilon_n) = m n \varepsilon_{mn}$$

und

$$\varepsilon_m \varepsilon_n = \varepsilon_{mn} = \frac{1}{mn}.$$

Damit resultirt das Multiplicationsgesetz

$$ab = a_1 \varepsilon_m \cdot b_1 \varepsilon_n = a_1 b_1 \varepsilon_{mn},$$

das wir so aussprechen:

Das Product von a und b ist eine Zahlengröße, die aus der Größe a und deren Bruchtheilen, so gebildet ist, wie b aus der Einheit und deren Bruchtheilen.

Man erkennt, daß die Multiplication hier bereits als selbständige Rechnungsart auftritt.

Jetzt erst kommen wir zu dem Nachweise, daß der Quotient ganzer Zahlen $\frac{a}{b}$, wo a kein Vielfaches von b ist, stets durch gebrochene Zahlengrößen darzustellen ist. In der That, ist $a = nb + r$, so ist $n + r\varepsilon_b = n + \frac{r}{b}$ diejenige Zahlengröße, welche mit b multiplicirt a gibt.

Der Quotient zweier gebrochener Zahlengrößen $a_1 \varepsilon_m$ und $b_1 \varepsilon_n$ ist wieder eine Zahlengröße derselben Art und zwar gleich $na_1 \varepsilon_{mb_1}$, denn es gilt

$$(na_1 \varepsilon_{mb_1}) b_1 \varepsilon_n = a_1 \varepsilon_m \cdot b_1 \varepsilon_{b_1} \cdot n \varepsilon_n = a.$$

Die Subtraction der aus dem Grundelemente e oder der Einheit und deren Bruchtheilen ε_n gebildeten Zahlengrößen ist so wie früher zu definiren, doch ist sie nur ausführbar, wenn der Minuend größer ist als der Subtrahend.

Soll die Subtraction ganzer Zahlen oder gebrochener Zahlengrößen stets möglich sein, d. h. soll auch in dem Falle, wo der Minuend a kleiner ist als der Subtrahend b , eine Zahlengröße $a - b$ existiren, die zu b addirt a gibt, so müssen wir wiederum neue Zahlengrößen einführen, an die wir dieselben allgemeinen Forderungen stellen wie an die oben aufgenommenen Größen $a \varepsilon_n$.

Wir definiren neben dem Grundelemente e als entgegengesetztes e' dasjenige, welches die Gleichung

$$a + e + e' = a$$

erfüllt, worin a nur aus e zusammengesetzt ist. Das Grundelement e heiße das *positive*, sein entgegengesetztes e' das *negative*. Die Summe von e und e' zu a addirt gibt wieder a , man schreibt daher auch

$$e + e' = 0.$$

Das entgegengesetzte Element des positiven Bruchtheiles ε_n von e heiße der negative Bruchtheil ε'_n , und wiederum soll

$$a + \varepsilon_n + \varepsilon'_n = a \quad \text{oder} \quad \varepsilon_n + \varepsilon'_n = 0$$

sein. Da

$$\begin{aligned} a &= a + ((\varepsilon_n + \varepsilon'_n) + (\varepsilon_n + \varepsilon'_n) + \cdots + (\varepsilon_n + \varepsilon'_n) \text{ } n \text{ mal}) = \\ &= a + n\varepsilon_n + n\varepsilon'_n = a + e + n\varepsilon'_n \end{aligned}$$

ist, wird

$$n \varepsilon'_n = e',$$

d. h. ε'_n ist der n^{te} Theil von e' und nach der früheren Bezeichnungsweise gleich $\frac{e'}{n}$.

Es gilt nun auch die Beziehung

$$n \varepsilon'_{mn} = \varepsilon'_m,$$

und darum kann man jede aus den beiden Elementen e und e' und deren Bruchtheilen zusammengesetzte Zahlengröße a auf die Form

$$a_1 \varepsilon_m + a_2 \varepsilon'_m$$

bringen, wo a_1 und a_2 nur aus e zusammengesetzt sind. Ist hierin $a_1 > a_2$, etwa $a_1 = a_2 + \alpha$, so wird

$$a = (a_2 \varepsilon_m + a_2 \varepsilon'_m) + \alpha \varepsilon_m = \alpha \varepsilon_m.$$

Ist $a_1 < a_2$ und zwar $a_2 = a_1 + \beta$, so folgt $a = \beta \varepsilon'_m$; wenn endlich $a_1 = a_2$ ist, so wird a gleich Null.

Zwei Zahlengrößen der neuen Art sind wieder *gleich*, wenn sie so umgeformt werden können, daß sie die positiven und negativen Elemente e und e' , ε_n und ε'_n in gleicher Anzahl enthalten.

Angenommen, daß die Zahlengrößen in der Form

$$a = a_1 + a_2 e' \quad \text{und} \quad b = b_1 + b_2 e'$$

gegeben seien, worin a_1, a_2, b_1, b_2 nur aus den positiven Elementen e und ε_n gebildet sind, so kann man auch sagen, dieselben sind einander gleich, wenn

$$a_1 + b_2 = b_1 + a_2$$

ist. In der That, mit $a = b$ muß auch

$$a_1 + a_2 e' + a_2 + b_2 = b_1 + b_2 e' + a_2 + b_2$$

und hierauf

$$a_1 + b_2 = b_1 + a_2 \quad \text{sein.}$$

Die genannte Bedingung ist also nothwendig, sie ist aber auch hinreichend, denn offenbar folgt umgekehrt aus derselben: $a = b$.

Zur Gleichheit von a und b muß demnach die Summe der positiven Elemente aus a und der entgegengesetzt genommenen negativen Elemente von b gleich sein der Summe der positiven Elemente von b und der entgegengesetzt genommenen negativen Elemente aus a .

Die *Addition der neuen Zahlengrößen* besteht wieder in der Vereinigung derselben zu einer Größe. Zufolge des jetzt geltenden Gleichheitsbegriffes kann man die positiven und negativen Theile gesondert vereinigen und die hervorgehenden Summen zusammenziehen oder man vollzieht die Verbindung in beliebig anderer Folge.

Die *Multiplication* zweier aus entgegengesetzten Grundelementen e, e' (oder den entgegengesetzten Einheiten $+1, -1$) und deren

Bruchtheilen $\frac{e}{m}$ und $\frac{e'}{n}$ gebildeten Zahlengrößen ist, wie wir gleich sehen werden, mit Hilfe der Multiplicationsgesetze der aus e zusammengesetzten ganzen Zahlen auszuführen, wenn man nur die Multiplication der Grundelemente, also die Producte

$$ee, ee', e'e, e'e'$$

auszuführen vermag.

Unter Festsetzung der Permanenz der früheren Verknüpfungsregeln setzen wir gleich $ee' = e'e$.

Um die genannte Behauptung zu beweisen, zeigen wir, daß neben

$$\frac{e}{m} \cdot \frac{e}{n} = \frac{ee}{mn} \quad \text{auch} \quad \frac{e}{m} \cdot \frac{e'}{n} = \frac{ee'}{mn} \quad \text{und} \quad \frac{e'}{m} \cdot \frac{e'}{n} = \frac{e'e'}{mn}$$

ist. In der That schliessen wir z. B. aus den Gleichungen

$$\begin{aligned} m \left(\frac{e}{m} \cdot \frac{e'}{n} \right) &= \left(\frac{e}{m} \cdot \frac{e'}{n} + \frac{e}{m} \cdot \frac{e'}{n} + \dots + \frac{e}{m} \cdot \frac{e'}{n} \right) ((m \text{ mal})) \\ &= \left(\frac{e}{m} + \frac{e}{m} + \dots + \frac{e}{m} (m \text{ mal}) \right) \cdot \frac{e'}{n} = e \cdot \frac{e'}{n} \end{aligned}$$

und

$$nm \left(\frac{e}{m} \cdot \frac{e'}{n} \right) = e \left(\frac{e'}{n} + \frac{e'}{n} + \dots + \frac{e'}{n} (n \text{ mal}) \right) = ee',$$

daß

$$\frac{e}{m} \cdot \frac{e'}{n} = \frac{ee'}{mn} = \frac{ee'}{nm} = \frac{e}{n} \cdot \frac{e'}{m}$$

wird. Ebenso gilt

$$\frac{e'}{m} \cdot \frac{e'}{n} = \frac{e'e'}{mn} = \frac{e'e'}{nm} = \frac{e'}{n} \cdot \frac{e'}{m}.$$

Wir müssen daher zur Multiplication unserer Zahlengrößen nur noch die Regeln für die Multiplication der Grundelemente kennen lernen.

Wegen $e + e' = 0$ ist

$$a = a + e + e' \quad \text{und} \quad ae = ae + e + e'.$$

Die Multiplication der ersten Gleichung mit e führt auf

$$ae = ae + ee + e'e,$$

und wenn $ee = e$ festgesetzt wird, folgt

$$e'e = ee' = e'.*)$$

Weil ferner die Gleichungen

$$ae' = ae' + e + e', \quad ae' = ae' + ee' + e'e'$$

bestehen, wird

$$e'e' = e.$$

Sind nun a und b zwei aus e und e' , ε_n und ε'_n zusammengesetzte Zahlengrößen, so besteht die Multiplication von a mit b darin, daß man eine dritte Zahlengröße aus a und der entgegengesetzten ae' und

*) Es ist entweder $ee = e$ oder $e'e' = e'$; eine Gleichung muß festgesetzt sein.

den Bruchtheilen beider so bildet, wie b aus den Grundelementen e und e' und deren Bruchtheilen zusammengesetzt ist.

Die Subtraction positiver d. h. aus e und den Bruchtheilen $\frac{e}{n}$ gebildeten Zahlengrößen ist mit Hilfe der aus den entgegengesetzten Elementen e' und $\frac{e'}{n}$ gebildeten negativen Zahlengrößen stets ausführbar, denn die Zahlengröße, welche zu b addirt a gibt, ist offenbar $a + be'$.

Diese GröÙe war früher mit $a - b$ bezeichnet, daher schreiben wir

$$a - b = a + be'$$

und nunmehr für be' einfach $-b$, für $e' - e$ und nennen $e' = -1$ die *negative Einheit*.

Die der positiven GröÙe b oder be entgegengesetzte negative ist nun $-b = -be = be'$ und in dieser heißt b der *absolute Betrag* von $-b$. — Will man anzeigen, daß eine GröÙe c nach gehöriger Transformation nur positive Elemente enthält, so setzt man derselben das Zeichen $+$ voraus. Ist b ganzzahlig aus -1 zusammengesetzt, so heißt diese GröÙe eine negative ganze Zahl. Ihr absoluter Betrag $-b$ wird mit $|b|$ bezeichnet.

Die Subtraction negativer GröÙen ist jetzt durch Addition der entgegengesetzten positiven GröÙen zu ersetzen.

Die Multiplication einer ZahlengröÙe a mit Null gibt Null, denn es ist

$$a(m + (-m)) = am + a(-m) = a(m - m) = am - am = 0,$$

und umgekehrt folgt aus $ab = 0$, daß ein Factor Null ist.

Die Division besteht wieder in der Ermittlung von b , wenn in $a - c$ a und c gegeben sind.

Die Rechnungsregeln folgen aus der Definition der Rechnungsarten.

Ein Product $ab = c$ ändert sich, sobald b andere und andere Werthe erhält, auÙer wenn $a = 0$ ist. Umgekehrt ist b stets bestimmt, auÙer in eben diesem Falle $a = 0$. Ist neben a auch c gleich Null, so kann man b beliebig wählen und darum ist $\frac{0}{0}$ keine bestimmte ZahlengröÙe. Ebenso wenig hat $\frac{c}{0}$ einen bestimmten Werth, denn wäre $\frac{c}{0}$ die bestimmte GröÙe, welche mit Null multiplicirt c gibt, so müÙte

$$\frac{c}{0} \cdot 0 = c = c \frac{0}{0}$$

sein oder die bestimmte GröÙe c wäre unbestimmt. Dieser Widerspruch nöthigt uns, die Division durch Null als unzulässig zu erklären und auszuschließen. —

Es ist nun gezeigt, daß die für die ganzen Zahlen aufgestellten Rechnungsarten mit den positiven und negativen ganzen und ge-

brochenen Zahlengrößen, die unter dem Namen der *rationalen Zahlengrößen* zusammengefaßt werden, mit alleiniger Ausnahme der Division durch Null widerspruchslos durchzuführen sind. Wir konnten die Rechnungsregeln für die neuen Größen ableiten und darum sind wir — wie gleich erklärt werden soll — berechtigt, dieselben fernerhin in die Rechnung aufzunehmen.

Wenn wir später irgendwo eine Aufgabe in den rationalen Zahlengrößen nicht lösen können, wie die Subtraction ganzer Zahlen in eben diesen Größen nicht durchführbar ist, sofern der Minuend kleiner ist als der Subtrahend, oder die Division ganzer Zahlen nicht in ganzen Zahlen zu bewerkstelligen ist, wenn der Dividend kein Multiplum des Divisors ist, werden wir neue Größen zu definiren und hierauf den Vergleich der neuen Größen untereinander und mit den rationalen vorzunehmen haben. Dabei fordern wir, daß sie denselben Verknüpfungsregeln folgen wie die ganzen Zahlen, und suchen ihre Rechnungsregeln, wie z. B. $ee' = e'$ eine war; oder besser wir fragen, ob und wie sind für die neuen Größen $a, b, c \dots$ die arithmetischen Grundoperationen (Addition, Multiplication, Subtraction und Division) zu definiren, damit $a + b, ab, a - b, \frac{a}{b}$ Größen derselben Art bleiben wie a und b selbst, und daß ferner die in den folgenden Gleichungen ausgesprochenen Gesetze gelten:

$$\begin{aligned} a + b &= b + a, & (a + b) + c &= (a + c) + b, \\ ab &= ba, & (ab)c &= (ac)b, & a(b + c) &= ab + ac, \\ (a - b) + b &= a, & \frac{a}{b}b &= a. \end{aligned}$$

Die Existenzberechtigung neuer Größen in der Rechnung werden wir wie früher bloß darin suchen, daß sich von ihnen die Rechnungsoperationen in der nun bestimmten Weise widerspruchslos ausführen lassen.

Das bisherige und das weiterhin zu gewinnende Größensystem für die Rechnung ist und wird auf einer — soweit wir hier sehen — allerdings bestimmten aber nur formalen Grundlage aufgebaut. Von vornherein besteht ja kein zwingender Grund, von neu definirten Größen zu verlangen, daß sie den Rechnungsgesetzen ganzer Zahlen gehorchen, aber diese (willkürliche) Forderung, die so lange erlaubt ist, als keine Widersprüche daraus erwachsen, hat eine unentbehrliche Harmonie in der Mathematik zur Folge. Es bedarf keiner Rechtfertigung, wenn wir gerade die Permanenz der formalen Gesetze zum Princip erheben; die Existenzberechtigung der neuen Größen in der Rechnung ist aber zweifellos, wenn die genannten Forderungen auf Grund gewählter Definitionen zu erfüllen sind.

Andrerseits wird man aber auch die Definition eines neuen Be-

griffes nach dem Princip der Permanenz der formalen Gesetze wählen. Bei der Einführung eines neuen Begriffes in die Mathematik ist es oftmals gewissermaßen willkürlich, in welcher Weise man die auf frühere Begriffe angewandten Operationen auf die neuen überträgt. Ist etwa die Definition der Potenz einer rationalen Zahlengröße a durch wiederholte Multiplication gegeben:

$$a^n = a \cdot a \dots a \text{ (} n \text{ mal),}$$

so zwingt uns von vornherein nichts, daß wir unter der ganzzahligen aber negativen Potenz etwas Bestimmtes verstehen. Unterwerfen wir aber die positive ganzzahlige Potenz den früheren Operationen und lassen wir die Rechnungsregel

$$\frac{a^m}{a^n} = a^{m-n} \quad (m > n)$$

auch dann gelten, wenn $m - n$ negativ oder Null ist, so folgt

$$a^{-(n-m)} = \frac{1}{a^{n-m}}$$

als Definition der negativen Potenz und ebenso $a^0 = 1$.

§ 5. Besondere Darstellung der rationalen Zahlengrößen. *)

Wir wollen eine bestimmte Darstellung der bisherigen positiven Zahlengrößen und zuerst der aus dem Grundelemente $e = 1$ gebildeten positiven ganzen Zahlen besprechen.

Ist α eine bestimmte Zahl ≥ 2 und a eine beliebige Zahl $\geq \alpha$, so wird a mit einer der ganzzahligen Potenzen

$$\alpha, \alpha^2, \alpha^3, \dots, \alpha^m, \alpha^{m+1}, \dots$$

übereinstimmen ($a = \alpha^m$) oder zwischen zwei aufeinander folgenden liegen ($\alpha^m < a < \alpha^{m+1}$). In diesem Falle ist nothwendig

$$a = \alpha^m c \quad \text{oder} \quad a = \alpha^m c + r,$$

wo die ganzen Zahlen $c < \alpha$ und $r < \alpha^m$ sind.

Ist $r \geq \alpha$, so muß

$$r = c_1 \alpha^{m_1} \quad \text{oder} \quad r = c_1 \alpha^{m_1} + r_1$$

sein, wo neben

$$m_1 < m, \quad 1 \leq c_1 < \alpha, \quad r_1 < \alpha^{m_1}$$

ist. Im Falle $r_1 \geq \alpha$ setze man neuerdings

$$r_1 = c_2 \alpha^{m_2} \quad \text{oder} \quad r_1 = c_2 \alpha^{m_2} + r_2,$$

$$m_2 < m_1, \quad 1 \leq c_2 < \alpha, \quad r_2 < \alpha^{m_2}$$

usw. So fortfahrend wird man zum mindesten nach $(m-1)$ maliger

*) Siehe Stolz: Vorlesungen über allgemeine Arithmetik.

Wiederholung zu einem Reste $r_{m-1} < \alpha$ gelangen und kann a als Summe

$$c\alpha^m + c_1\alpha^{m-1} + \dots + c_{m-1}\alpha + r_{m-1} \quad (1)$$

darstellen, in der c, c_1, \dots, c_{m-1} der Größenreihe

$$0, 1, \dots, \alpha - 1$$

entnommen sind.

Diese Darstellung ist nur auf eine Art möglich; denn setzt man auch

$$a = d\alpha^n + d_1\alpha^{n-1} + \dots + d_{n-1}\alpha + p_{n-1},$$

so ist die Übereinstimmung der beiden Darstellungen leicht erwiesen.

Da sowohl

$$\alpha^m \leq a < \alpha^{m+1} \quad \text{als auch} \quad \alpha^n \leq a < \alpha^{n+1}$$

gilt, ist ja

$$\alpha^m < \alpha^{n+1}, \quad \alpha^n < \alpha^{m+1},$$

und diese Ungleichungen bestehen nur zusammen, wenn $n = m$ ist. Weil ferner

$$c\alpha^m \leq a < (c+1)\alpha^m, \quad d\alpha^m \leq a < (d+1)\alpha^m$$

ist, muß

$$c < d+1, \quad d < c+1, \quad \text{also} \quad d = c$$

sein. Durch dieselben Schlüsse folgt $d_1 = c_1, d_2 = c_2, \dots, p_{m-1} = r_{m-1}$, q. e. d.

Nehmen wir nun eine aus der Einheit und deren Bruchtheilen gebildete (positive) rationale GröÙe $\frac{a}{b}$ auf, so ist entweder

$$a = c_0 b \quad \text{oder} \quad a = c_0 b + r_0,$$

wo von den ganzen Zahlen c_0 und r_0 die letztere kleiner ist als b . Es wird also

$$\frac{a}{b} = c_0 \quad \text{oder} \quad c_0 < \frac{a}{b} < c_0 + 1.$$

Bildet man $\alpha r_0 = c_1 b$ oder $\alpha r_0 = c_1 b + r_1$, wo c_1 eine ganze Zahl aus der Reihe $0, 1, 2, \dots, \alpha - 1$ und $1 \leq r_1 < b$ ist, so wird

$$\frac{a}{b} = c_0 + \frac{c_1}{\alpha} \quad \text{oder} \quad c_0 + \frac{c_1}{\alpha} < \frac{a}{b} < c_0 + \frac{c_1 + 1}{\alpha}.$$

Indem man die Divisionen

$$\frac{a}{b} = c_0 + \frac{r_0}{b}, \quad \frac{\alpha r_0}{b} = c_1 + \frac{r_1}{b}, \quad \frac{\alpha r_1}{b} = c_2 + \frac{r_2}{b}, \dots$$

$$\frac{\alpha r_n}{b} = c_{n+1} + \frac{r_{n+1}}{b}, \dots$$

fortsetzt, folgt für $\frac{a}{b}$ eine Darstellung:

$$\frac{a}{b} = c_0 + \frac{c_1}{\alpha} + \frac{c_2}{\alpha^2} + \dots + \frac{c_m}{\alpha^m}, \quad (2)$$

wenn die Division einmal ohne Rest r_m aufgeht. Weil mit der Gleichung $\frac{\alpha r_{m-1}}{b} = c_m$

$$\frac{\alpha^m r_0}{b} = \alpha^{m-1} c_1 + \alpha^{m-2} c_2 + \dots + \alpha c_{m-1} + c_m$$

wird, sieht man, daß die genannte Darstellung nur möglich ist, wenn b allein aus Primfactoren von α zusammengesetzt ist; dann aber gibt es für $\frac{a}{b}$ nur eine in Rede stehende Darstellung, in der man auch c_0 in der früheren Weise ausdrücken kann.

Sollte keine der Divisionen aufgehen, so gibt es in der Reihe der Größen r höchstens $b - 1$ verschiedene, da nur $b - 1$ ganze Zahlen kleiner als b existiren. Wenn es somit in der Reihe $r_0, r_1 \dots r_{b-1}$ einen wiederkehrenden Werth r_m gibt und etwa

$$r_{m+k} = r_k$$

ist, so wird

$$c_{m+k+x} = c_{m+x}, \quad r_{m+k+x} = r_{m+x} \quad (x = 1, 2 \dots k)$$

und folglich wiederholen sich in der Reihe der Größen $c_{m+1}, c_{m+2} \dots$ die $k \leq b - 1$ Größen $c_{m+1}, c_{m+2} \dots c_{m+k}$ ohne Ende.

Die Zahl

$$c_{m+1} \alpha^{k-1} + c_{m+2} \alpha^{k-2} + \dots + c_{m+k-1} \alpha + c_{m+k} = C$$

heißt die zu $\frac{a}{b}$ gehörige Periode in Bezug auf die Basis α . Ob man in dem Falle des Erscheinens einer solchen Periode

$$\frac{a}{b} = c_0 + \frac{c_1}{\alpha} + \frac{c_2}{\alpha^2} + \dots + \frac{c_m}{\alpha^m} + \frac{C}{\alpha^{m+k}} \left(1 + \frac{1}{\alpha^k} + \frac{1}{\alpha^{2k}} + \dots \right)$$

setzen kann, muß erst untersucht werden, denn jetzt können wir aus der Beschaffenheit unmittelbar aufeinander folgender Größen c nur schließen, daß die Ungleichungen

$$c_0 + \frac{c_1}{\alpha} + \frac{c_2}{\alpha^2} + \dots + \frac{c_n}{\alpha^n} < \frac{a}{b} < c_0 + \frac{c_1}{\alpha} + \frac{c_2}{\alpha^2} + \dots + \frac{c_{n+1}}{\alpha^{n+1}}$$

bestehen. Der absolute Betrag der Differenz der Größen, zwischen welchen $\frac{a}{b}$ eingeschlossen ist, ist gleich $\frac{1}{\alpha^n}$ und dieser kann bei hinlänglich groß gewähltem n kleiner gemacht werden, als ein noch so kleines Element $\varepsilon, = \frac{1}{\nu}$.

Wir erkennen also, daß die Darstellung einer positiven rationalen GröÙe $\frac{a}{b}$ nicht immer in der Form einer Summe einer endlichen Anzahl ganzer Zahlen und Brüche mit den Potenzen einer fest gewählten Zahl α als Nenner möglich ist, und bei dem Versuche, diese Darstellung allgemein durchzuführen, begegnen wir Summen mit einer

unbeschränkten Anzahl von Elementen e und $\varepsilon_n = \frac{e}{n}$, die wir nun für sich behandeln müssen.

§ 6. Einführung der irrationalen Größen.

Wir ziehen ganz allgemein Größen in den Kreis der Betrachtung, die im Gegensatz zu den rationalen Zahlengrößen durch Zusammensetzung einer unbeschränkten Anzahl von (vorderhand bloß positiven) Elementen gebildet sind. Begrifflich ist eine solche Größe durch eine „Reihe“

$$\varepsilon_{n_1} + \varepsilon_{n_2} + \dots + \varepsilon_{n_m} + \dots$$

vollkommen definiert, wenn man angeben kann, welche Elemente und wie oft diese in der Reihe auftreten.

Wir denken uns durch die Reihe ein Object, eine Größe gesetzt, fassen die Reihe im Gegensatz zu den Elementen und den Summen einer endlichen Anzahl von Elementen als Größe für sich auf.

Es muß zunächst gezeigt werden, wie man die neuen Größen untereinander und mit den rationalen Zahlengrößen vergleichen kann.

Die Definition der Gleichheit rationaler Größen, die auf der Transformation in gleiche Elemente ε , beruhte, ist hier nicht anwendbar, weil eine unbeschränkte Anzahl von Transformationen unausführbar ist. Man kann z. B. die Gleichheit von

$$\frac{1}{3} \quad \text{und} \quad \frac{3}{10} + \frac{3}{10^2} + \frac{3}{10^3} + \dots,$$

wo 10 die Stelle des früheren α vertritt und 3 die Periode von $\frac{1}{3}$ ist, nicht in der früheren Weise darthun, und man muß eine neue Definition der Gleichheit aufsuchen.

Dazu führt die folgende Definition: Nimmt man aus einer Größe a der neuen Art eine willkürliche aber beschränkte Anzahl von Elementen heraus, so sagt man, man habe einen *Bestandtheil* herausgegriffen. Darnach heißt b ein Bestandtheil von a , wenn eine beschränkte Anzahl von Elementen in a so transformirt werden kann, daß in a nebst b noch andere Elemente vorkommen.

Größen der neuen Art, in denen jede Zahl als Bestandtheil enthalten ist, heißen *unendlich*. Wir schließten diese Größen von der Betrachtung aus, bemerken aber gelegentlich, daß eine Größe, die ein noch so kleines Element unendlich oft enthält, selbst unendlich ist. Da man z. B. zeigen kann, daß

$$1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} + \dots$$

das Element $\frac{1}{2}$ unendlich oft enthält, indem ja

$$\frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} + \cdots + \frac{1}{n+n} > n \frac{1}{2n} = \frac{1}{2}$$

ist, so ist die genannte GröÙe unendlich.

Eine GröÙe a heißt endlich, wenn es eine aus einer angebbaren Anzahl von Elementen gebildete (rationale) ZahlengröÙe gibt, die in a nicht als Bestandtheil enthalten ist, oder wenn man eine aus einer beschränkten Anzahl von Elementen zusammengesetzte ZahlengröÙe b angeben kann, der Beschaffenheit, daß jede aus Elementen von a gebildete ZahlengröÙe in b enthalten ist.

Nach diesen Definitionen heißen zwei GröÙen der neuen Art gleich, wenn jeder Bestandtheil der einen GröÙe in der anderen als Bestandtheil enthalten ist.

Diese Definition umfaßt offenbar die früheren Definitionen der Gleichheit rationaler ZahlengröÙen, bei denen wir ja auch von Bestandtheilen sprechen können.

Zwei unendliche GröÙen sind einander gleich und jede ist größer als jede endliche ZahlengröÙe.

Wir stellen nun folgende evidenten Sätze auf:

- 1) ist b ein Bestandtheil von a und $b = c$, so ist auch c Bestandtheil von a .
- 2) Ist c in b und b in a als Bestandtheil enthalten, so ist auch c Bestandtheil von a .
- 3) Sind a und b ungleich, so muß es eine GröÙe c geben, die in a oder b enthalten, aber in b respective a nicht enthalten ist. Dann ist jeder Bestandtheil von b in a , beziehungsweise jeder Bestandtheil von a in b enthalten.

In dem ersten Falle heißt a größer als b , im zweiten a kleiner als b .

Zum Beweise des dritten Satzes sei

$$b = b_1 + b_2, \quad b_1 < c,$$

also b_1 ein Bestandtheil von c . Wenn c Bestandtheil von a ist, wird b_1 in b und a enthalten sein; und das gilt von jedem Bestandtheil von b .

Für die Gleichheit zweier GröÙen läßt sich ein einfaches Kriterium angeben.

Wir bemerken zunächst, daß in der Folge von ZahlengröÙen

$$\frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \dots, \frac{m}{n}, \frac{m+1}{n}, \dots$$

gewiß eine erste existirt, die gleich oder größer ist als eine vorgelegte endliche GröÙe a . Es sei

$$\frac{m+2}{n} \geq a,$$

dann wird

$$\frac{m+1}{n} < a, \quad \frac{m}{n} < a, \quad \frac{m-1}{n} < a, \dots$$

d. h. $\frac{m}{n}$ ist Bestandtheil von a . Bringt man die Gröfse a nach Vereinigung einer endlichen Anzahl von Elementen auf die Form

$$a = a_1 + a_2, \text{ wo } a_1 \geq \frac{m}{n} \text{ ist,}$$

so wird

$$a_2 < \frac{2}{n}.$$

Wählt man nun eine beliebig kleine Gröfse δ , so kann man nach einer endlichen Anzahl von Operationen einen solchen Bestandtheil a_1 aus a herausgreifen, dafs $a - a_1 < \delta$ wird. Man hat n nur so groß zu wählen, dafs $\frac{2}{n} < \delta$ ist.

Sind zwei gleiche Gröfsen a und b gegeben, so zerlege man dieselben durch eine endliche Anzahl von Transformationen in

$$a = a_1 + a_2, \quad b = b_1 + b_2,$$

wo a_2 und b_2 kleiner sind als eine positive Gröfse δ . Weil der absolute Betrag von $a_1 - b_1$, den wir mit $|a_1 - b_1|$ bezeichnen, auch kleiner ist als δ , erhalten wir den Satz:

Aus zwei gleichen Zahlengröfsen a und b lassen sich stets solche Bestandtheile a_1 und b_1 herausnehmen, dafs die Differenzen $(a - a_1)$, $(b - b_1)$ und der absolute Betrag $|a_1 - b_1|$ kleiner wird als eine beliebig kleine vorgegebene positive Gröfse.

Dieser Satz wird durch seine Umkehrung von Bedeutung, die folgendermaßen lautet:

Kann man von zwei Gröfsen $a = a_1 + a_2$, $b = b_1 + b_2$, wo die Bestandtheile a_2 und b_2 kleiner sind als eine vorgegebene beliebig kleine Gröfse δ , zeigen, dafs auch $|a_1 - b_1| < \delta$ wird, so sind a und b einander gleich, d. h. jeder Bestandtheil von a ist in b und umgekehrt jeder Bestandtheil von b ist in a enthalten.

Beweis. Es sei c ein Bestandtheil von a , dann zerlege man a derart in $a_1 + a_2$, dafs $a_2 < \delta$ und $a_1 > c$ wird. Ferner sei in $b = b_1 + b_2$ $b_2 < \delta$ und $|a_1 - b_1| < \delta$.

Zufolge der letzten Bedingung ist entweder a_1 Bestandtheil von b_1 , und dann wird c in a und b enthalten sein, oder es ist b_1 Bestandtheil von a_1 , also $a_1 - b_1 < \delta$. Es sei $a_1 = b_1 + \varepsilon$, wo ε ebenso wie a_1 und b_1 eine rationale Zahlengröfse bedeutet, die kleiner sein soll als δ , dann wird $b_1 > c - \varepsilon$ und $b - c > b_2 - \varepsilon$. Nehmen wir an, dafs c kein Bestandtheil von b sei, so mufs $\varepsilon > b_2$ sein und $a_1 - b_1 = \varepsilon$ wird nicht kleiner als das beliebig kleine δ . Ist aber c Bestandtheil von b , so wird $\varepsilon < b_2$ und unsere Bedingungen sind erfüllt. Damit ist der Satz bewiesen.

Sind a und b zwei durch eine unbeschränkte Anzahl von Elementen zusammengesetzte ungleiche Größen, so kann man in dem Falle $b < a$ stets eine rationale GröÙe δ so finden, daÙ auch noch

$$b + \delta < a$$

wird; ist aber $a < b$, so existirt eine GröÙe δ , für die noch die Ungleichung

$$b = \delta > a$$

erfüllt wird.

Beweis. Es sei

$$a = \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \cdots + \frac{1}{n_r} + \cdots$$

und $b < a$, dann gibt es einen Bestandtheil c von a , der nicht in b enthalten ist. Denken wir jetzt aus a so viele Elemente $\frac{1}{n_\mu}$ herausgegriffen, daÙ

$$c \leq \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \cdots + \frac{1}{n_r},$$

so wird $c + \frac{1}{n_{r+1}}$ auch Bestandtheil von a sein, aber gewiß nicht von $b + \delta$, wenn $\delta \leq \frac{1}{n_{r+1}}$ gewählt ist. Man kann also ein δ der Forderung gemäß angeben.

Ist $b < a$, so kann man aber auch eine GröÙe δ so bestimmen, daÙ $b + \delta = a$ wird.

Beweis. In der That wählen wir aus der Elementenreihe

$$1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \cdots, \frac{1}{n}, \cdots$$

zwei aufeinander folgende Terme $\frac{1}{n_1-1}, \frac{1}{n_1}$, so daÙ

$$b + \frac{1}{n_1-1} > a \geq b + \frac{1}{n_1}$$

und gilt hier die Gleichung $a = b + \frac{1}{n_1}$, so ist $\frac{1}{n_1}$ die verlangte GröÙe δ . Im Falle $a > b + \frac{1}{n_1}$ suche man ein Element $\frac{1}{n_2}$, so daÙ

$$b + \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2-1} > a \geq b + \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}.$$

Es kann hier $n_2 \geq n_1$, aber nicht $n_2 < n_1$ sein, sonst wäre nämlich die erste Ungleichung nicht richtig. — Gilt hier das Gleichheitszeichen, so ist $\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} = \delta$, andernfalls bestimmt man ein Element, so daÙ

$$b + \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3-1} > a \geq b + \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3}$$

usw. Durch das beschriebene, vielleicht endlose aber bestimmte Verfahren wird eine GröÙe δ definirt, denn man kann ihre Elemente nach und nach angeben; sie ist endlich und erfüllt die Gleichung

$$b + \delta = a.$$

In der That: wäre sie unendlich, so hätte sie einen Bestandtheil c , der größer ist als irgend eine willkürlich vorgelegte Zahlengröße G . Ist dann ν so gewählt, daß

$$G < b + \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \dots + \frac{1}{n_\nu},$$

so muß

$$a > G$$

sein, denn

$$b + \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \dots + \frac{1}{n_\nu}$$

ist Bestandtheil von a usw. Nun wäre aber a auch unendlich und das widerspricht der Voraussetzung.

Endlich ist $b + \delta = a$, denn jeder Bestandtheil c von $b + \delta$ ist in a enthalten und umgekehrt. — Es sei wieder ν so gewählt, daß

$$c < b + \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \dots + \frac{1}{n_\nu},$$

dann folgt unmittelbar: c ist Bestandtheil von a , denn die rechtsstehende Größe ist in a enthalten.

Ist a andererseits in $a_1 + a_2$ zerlegt, wo a_1 aus einer endlichen Anzahl von Elementen zusammengesetzt ist, so ist dieser Bestandtheil a_1 von a in $b + \delta$ enthalten. — Nimmt man in δ die gleichen Elemente zusammen, definiert δ also durch die Reihe:

$$\frac{\nu_1}{m_1} + \frac{\nu_2}{m_2} + \dots + \frac{\nu_\mu}{m_\mu} + \dots,$$

so bestehen die Ungleichungen

$$b + \frac{\nu_1}{m_1} + \frac{\nu_2}{m_2} + \dots + \frac{\nu_\mu + 1}{m_\mu} > a > b + \frac{\nu_1}{m_1} + \frac{\nu_2}{m_2} + \dots + \frac{\nu_\mu}{m_\mu},$$

denn es ist (außer im Falle $m_\mu = 2$)

$$\frac{\nu_\mu + 1}{m_\mu} > \frac{(\nu_\mu - 1)}{m_\mu} + \frac{1}{m_\mu - 1} = \frac{\nu_\mu}{m_\mu} + \frac{1}{m_\mu(m_\mu - 1)}.$$

Wählt man μ derart, daß $\frac{1}{m_\mu} < a_2$, so wird

$$b + \frac{\nu_1}{m_1} + \frac{\nu_2}{m_2} + \dots + \frac{\nu_\mu}{m_\mu} < a_1$$

und a_1 erscheint als Bestandtheil von $b + \delta$.

Nach diesen Ausführungen ist es ein Leichtes, die Gleichheit von

$$\frac{3}{10} + \frac{3}{10^2} + \dots + \frac{3}{10^n} + \dots \quad \text{und} \quad \frac{1}{8}$$

oder die von

$$1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \dots + \frac{1}{2^{n-1}} + \dots \quad \text{und} \quad 2$$

oder

$$\frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \frac{1}{3 \cdot 4} + \dots + \frac{1}{n(n-1)} \quad \text{und} \quad 1$$

zu beweisen, indem man zeigt, daß jeder Bestandtheil der links stehenden Größen in den entsprechenden rechts vorkommt und umgekehrt.

Nach Aufstellung des Begriffes einer aus einer unbeschränkten Anzahl von Elementen gebildeten GröÙe, nach den Definitionen des Gleich-, GröÙser- und Kleiner-Seins zweier solcher GröÙen, muß man untersuchen, „ob und wie sich für dieselben die arithmetischen Grundoperationen so definiren lassen, daß erstens die aus zweien GröÙen a und b gebildeten GröÙen

$$a + b, \quad a - b, \quad ab, \quad \frac{a}{b}$$

GröÙen derselben Art sind und zweitens die in den auf Seite 15 angegebenen Gleichungen ausgesprochenen Gesetze gelten.“

Die erste Gleichung verlangt, daß die *Summe* zweier GröÙen a und b als eine dritte GröÙe defnirt wird, welche alle Elemente von a und b enthält und zwar in der Vielheit, als sie in a und b zusammen vorkommen.

Die Summe $a + b$ ist mit a und b endlich, denn es gibt ZahlengröÙen α und β , die gröÙser sind als jeder Bestandtheil von a resp. b , und $\alpha + \beta$ wird gröÙser als jeder Bestandtheil von $a + b$.

Die Summe einer angebbaren Anzahl endlicher GröÙen ist wieder endlich, die Additionsgesetze bleiben erhalten und gleiche GröÙen vertreten einander in der Summe.

Das *Product* zweier GröÙen a und b ist eine GröÙe, die aus den Producten jeglicher Elemente von a und b zusammengesetzt ist. Darnach kann man angeben, welche Elemente und in welcher Anzahl diese in dem Product vorkommen, dasselbe ist also begrifflich defnirt. Man muß nur zeigen, daß das Product mit den Factoren endlich bleibt, daß die Multiplicationsgesetze erhalten bleiben und sich in dem Product gleiche GröÙen vertreten können.

Zufolge der Definition der endlichen GröÙe kaun man eine rationale ZahlengröÙe α angeben derart, daß jeder Bestandtheil ($a_1 + a_2 + \dots + a_m$) von a in α enthalten ist. Ebenso sei β eine rationale GröÙe, die jeden Bestandtheil ($b_1 + b_2 + \dots + b_n$) von b enthält. Greift man hierauf aus dem Producte ab einen Bestandtheil

$$\gamma = \sum_{\mu=1}^k \sum_{\nu=1}^l a_{\mu} b_{\nu}$$

heraus, wo k und l kleiner oder gleich m beziehungsweise n bleiben, so ist

$$\gamma \leq \sum_{\mu=1}^m \sum_{\nu=1}^n a_{\mu} b_{\nu} < \alpha \cdot \beta$$

d. h. jeder Bestandtheil des Productes ist in $\alpha\beta$ enthalten und ab ist endlich.*)

Unter steter Verwendung des verallgemeinerten Gleichheitsbegriffes lassen sich die Multiplicationsgesetze beweisen und endlich ist auch $ab = ab'$, wenn $b = b'$ ist. Dazu muß wieder jeder Bestandtheil γ von ab auch in ab' enthalten sein und umgekehrt.

In γ kommt ein Bestandtheil von a und einer von b vor, der letztere ist auch in b' enthalten. Es läßt sich also stets ein Bestandtheil $(b'_1 + b'_2 + \dots + b'_m)$ von b' angeben, der mit dem in Rede stehenden Bestandtheil von a multiplicirt zu einem Producte führt, das größer oder gleich γ ist. Folglich ist γ auch in ab' enthalten.

Umgekehrt ist jeder Bestandtheil von ab' auch in ab enthalten, und darum ist $ab = ab'$. —

Jetzt sind wir zu beurtheilen im Stande, wann die Summe einer vorgegebenen unendlichen Menge (zuerst blos) positiver und rationaler Zahlengrößen a_1, a_2, \dots, a_n , d. i. diejenige GröÙe, welche alle Elemente a , in derselben Vielheit wie die Menge enthält, eine bestimmte Bedeutung hat. Vor allem darf kein Element oder Summand a , unendlich sein und keiner unendlich oft vorkommen, sonst wäre die Summe auch unendlich und darum unbestimmt, weil wir nur sagen können, sie ist größer als jede endliche ZahlengröÙe. Ferner muß jede aus einer endlichen Anzahl von Elementen a , gebildete Summe kleiner sein als eine angebbare ZahlengröÙe, damit die Summe der unendlich vielen Elemente endlich ist.

In der That, bedeutet S_m die Summe irgend einer endlichen Anzahl von Elementen, so kann man in der Reihe von Summanden

$$a_1, a_2, \dots, a_n, \dots$$

ein n stets so bestimmen, daß

$$S_m \leq \sum_{v=1}^n a_v$$

ist. Wäre nun $S_m > G$, wo G irgend eine angebbare ZahlengröÙe bezeichnet, so besäÙe S_m einen Bestandtheil, der in G nicht mehr enthalten ist. Doch weil S_m nur Bestandtheile besitzt, die der Summe aller Elemente a_v angehören, so müÙte die Summe unendlich sein, indem ja G beliebig groß gewählt werden kann. Die genannte Bedingung ist also nothwendig; sie ist aber auch hinreichend, denn wenn eine ZahlengröÙe $g > S_m$ existirt, wird

*) Hier ist $\sum_{v=1}^n b_v$ das Zeichen für $b_1 + b_2 + \dots + b_n$, $\sum_{\mu=1}^m \sum_{v=1}^n a_\mu b_v$ das

Zeichen für die Summe aller Combinationen $a_\mu b_v$, wenn μ und v die Zahlenreihen $1, 2, \dots, m$ und $1, 2, \dots, n$ durchlaufen.

$$g > \sum_{v=1}^m a_v$$

sein, wie groß auch m gewählt sein mag, d. h. g enthält Bestandtheile, die der Summe nicht angehören. Wenn somit jeder Bestandtheil der Summe in der angebbaren Größe g enthalten ist, wird die Summe aller Elemente endlich.

Zufolge des für die aus unendlich vielen Elementen zusammengesetzten Größen geltenden Gleichheitsbegriffes kann man die Summanden beliebig vertauschen, ohne daß die Summe der neu geordneten Reihe von der ersten Summe abweicht.

Man kann die Summanden auch beliebig in Gruppen zusammenfassen und diese summieren. Hierbei ist es für das Resultat gleichgültig, ob man Gruppen mit einer endlichen Anzahl und eine mit einer unbeschränkten Anzahl von Elementen bildet, oder eine endliche Anzahl von Gruppen, deren jede unendlich viele Elemente besitzt, oder ob man unendlich viele Gruppen mit einer endlichen Anzahl von Elementen zusammensetzt; die Summe besitzt jedesmal dieselben Bestandteile.

Es ist auch erlaubt, jedes Element a_v durch eine demselben gleichwerthige Größe zu ersetzen, ja selbst dann, wenn die Elemente a_v aus unendlich vielen Elementen zusammengesetzt sind:

$$a_v = b_1^{(v)} + b_2^{(v)} + \dots + b_\mu^{(v)} + \dots,$$

denn die Summe der Summanden $b_\mu^{(v)}$ ist mit der Summe der a_v endlich und dieser gleich.

In der That existirt ja eine Größe g , die größer ist als jeder Bestandtheil der Summe a_v , und wie groß man n auch wählen mag, es wird

$$g > a_1 + a_2 + \dots + a_n.$$

Nimmt man hierauf irgend eine Summe von Größen $b_\mu^{(v)}$:

$$b_\alpha^{(v_\alpha)} + b_\beta^{(v_\beta)} + \dots + b_x^{(v_x)},$$

so ist

$$a_{v_\alpha} + a_{v_\beta} + \dots + a_{v_x} \leq b_\alpha^{(v_\alpha)} + b_\beta^{(v_\beta)} + \dots + b_x^{(v_x)},$$

also umsomehr

$$g > b_\alpha^{(v_\alpha)} + b_\beta^{(v_\beta)} + \dots + b_x^{(v_x)}$$

und die Summe der Größen b ist endlich. Ebenso leicht folgt die zweite Behauptung. —

Aus der Definition des Productes zweier aus unendlich vielen Elementen zusammengesetzten Größen a und b erschließt man, wie eine endliche Summe unendlich vieler Summanden mit einer Größe multiplicirt wird und wie man das Product zweier solcher Summen erhält.

Es wird

$$(a_1 + a_2 + \dots + a_n + \dots) b = b a_1 + b a_2 + \dots + b a_n + \dots \\ = b(a_1 + a_2 + \dots + a_n + \dots)$$

und

$$(a_1 + a_2 + \dots + a_n + \dots) (b_1 + b_2 + \dots + b_n + \dots) \\ = a_1 b_1 + a_1 b_2 + a_2 b_1 + \dots + a_n b_1 + a_{n-1} b_2 + a_1 b_n + \dots$$

Bezeichnet man die Summe der Größen a_r mit S_a , die der Größen b_r mit S_b , so haben die neu gebildeten Reihen die Summe $b \cdot S_a$ resp. $S_a \cdot S_b$. —

Ist eine unendliche Menge endlicher Größen

$$a_1, a_2, \dots, a_n, \dots$$

gegeben, unter denen nicht unendlich viele gleiche vorkommen, so sagt man, daß die Summen

$$S_1 = a_1, \quad S_2 = a_1 + a_2, \quad S_3 = a_1 + a_2 + a_3, \dots \\ S_n = a_1 + a_2 + \dots + a_n$$

gegen eine GröÙe S *convergiren*, wenn nach Annahme einer beliebig kleinen positiven GröÙe δ eine ganze Zahl m so bestimmt werden kann, daß für alle Werthe von $n \geq m$

$$S - S_n < \delta.$$

Wenn die unendliche Menge von Größen a_r eine endliche Summe S besitzt, so convergiren die Summen $S_1, S_2 \dots S_n \dots$ nach der GröÙe S .

Wählt man irgend eine kleine positive GröÙe ε , so kann man zu dieser eine ganze Zahl m derart finden, daß für alle $n \geq m$

$$S - S_n < \varepsilon$$

wird und diese Ungleichung stimmt mit der früheren überein, sobald $\varepsilon < \delta$ ist. Dann convergiren die Größen $S_1, S_2 \dots S_n \dots$ wirklich nach S .

Convergiren umgekehrt die Summen $S_1, S_2 \dots S_n \dots$ nach der endlichen GröÙe S , so ist S die Summe der Reihe

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n + \dots,$$

denn wegen der jetzt geltenden Ungleichungen

$$S - S_n < \delta \quad (n \geq m)$$

ist die Summe endlich und von S nicht verschieden.

Damit ist die Definition der Summe einer unendlichen Reihe vollzogen und wir sehen, daß die Summe einer unendlichen Menge positiver rationaler Größen a_r gleich ist der durch die Zusammensetzung dieser Größen definirten GröÙe, die wir oben als ein im Gegensatz zu den gegebenen Gliedern für sich bestehendes bestimmtes Object gedacht haben.

Jetzt können wir diese Größen direct als Summe unendlicher Reihen in die Rechnung einführen und verstehen unter der Summe diejenige Gröfse, nach welcher die Theilsummen $S_1, S_2 \dots S_n \dots$ convergiren. Wir müssen nur noch zeigen, dafs bei gehöriger Definition auch $a - b$ und $\frac{a}{b}$ Größen gleicher Art bleiben wie a und b und dafs die Gesetze gelten:

$$(a - b) + b = a, \quad \frac{a}{b} b = a.$$

Die *Subtraction* neuer Größen a und b macht keine Schwierigkeit, wenn der Minuend gröfser ist als der Subtrahend. Andernfalls mufs man auch *Größen* einführen, die aus einer unendlichen Anzahl positiver und negativer Elemente zusammengesetzt sind.

Es seien

$$a = a_1 + (-a_2), \quad b = b_1 + (-b_2)$$

zwei solche Größen, wo a_1, a_2, b_1, b_2 aus unendlich vielen positiven Elementen gebildet sind. Sie heißen gleich, wenn

$$a_1 + b_2 = a_2 + b_1$$

ist. Ist dann $a = b$ und $b = c$, wo $c = c_1 + (-c_2)$ sei, so folgt aus

$$a_1 + b_2 = a_2 + b_1 \quad \text{und} \quad b_1 + c_2 = b_2 + c_1$$

$$a_1 + c_2 = a_2 + c_1 \quad \text{oder} \quad a = c.$$

Eine aus unendlich vielen positiven und negativen Elementen zusammengesetzte Gröfse a heifst wieder *endlich*, wenn eine positive Gröfse existirt, die gröfser ist als der absolute Betrag irgend eines Bestandtheiles von a .

Ist a endlich, so mufs umgekehrt sowohl die aus den positiven als auch die aus den negativen Elementen von a allein zusammengesetzte Gröfse endlich sein. —

Eine Zahlengröfse a aus unendlich vielen positiven und negativen Elementen $\varepsilon_{m_\mu} = \frac{1}{m_\mu}$ resp. $\varepsilon'_{n_\nu} = -\frac{1}{n_\nu}$ kann durch eine endliche Anzahl von Operationen stets so transformirt werden, dafs der absolute Betrag der negativen (oder positiven) Elemente kleiner wird als eine beliebig kleine positive Gröfse δ .

Bezeichnet man

$$\alpha = \sum_{\mu=1,2,\dots} \frac{1}{m_\mu}, \quad \beta = \sum_{\nu=1,2,\dots} \frac{1}{n_\nu}$$

und ist etwa $\alpha > \beta$, so kann man $\beta = \beta_1 + \beta_2$ so zerlegen, dafs β_1 Bestandtheil von α und $\beta_2 < \delta$ wird. Setzt man darnach $\alpha = \alpha_1 + \beta_1$, so wird

$$a = \alpha - \beta = \alpha_1 + (-\beta_2).$$

Wäre $\alpha < \beta$, so entstünde in dieser Form ein positiver Theil, der kleiner ist als das vorgegebene δ .

Aus den letzten Definitionen und Sätzen gehen für die neuen Größen aus positiven und negativen Elementen wie früher die Definitionen der Summe, des Productes und der Differenz entsprechend den Verknüpfungsregeln ganzer Zahlen hervor.

Wir betrachten hierauf wieder *die Summe einer unendlichen Menge positiver und negativer Größen*, unter denen keine mit unendlichem absoluten Betrage und keine unendlich oft vorkommt. Sie wird endlich sein, wenn eine positive Größe g existirt, die größer ist als der absolute Betrag jedes Bestandtheiles der Menge, und daraus folgt, daß die Summen der positiven und negativen Elemente für sich endlich sind, wenn die aus beiderlei Elementen gebildete Größe endlich ist (nach der früheren Definition).

Wir können auch sagen, *die nothwendige und hinreichende Bedingung dafür, daß die Summe endlich ist, besteht in der Endlichkeit der Summe der positiven und negativen Elemente für sich, oder der Endlichkeit der Summe der absoluten Beträge aller Elemente.*

Nennen wir nämlich diejenigen Größen, in welchen die positiven Elemente überwiegen, a_v , diejenigen, wo die negativen Elemente vorherrschen, b_v , und setzt man

$$a_v = a_v^{(1)} + (-a_v^{(2)}), \quad b_v = b_v^{(1)} + (-b_v^{(2)})$$

und denkt

$$a_v^{(2)} < \delta_v, \quad b_v^{(1)} < \varepsilon_v$$

gewählt, wo δ_v und ε_v kleiner seien als das Glied a_v einer Reihe positiver Elemente:

$$a_1 + a_2 + \dots + a_v + \dots$$

mit endlicher Summe, so wird die ursprüngliche Summe gewiß endlich sein, sobald

$$\sum a_v^{(1)} \quad \text{und} \quad \sum b_v^{(2)}$$

endlich sind.

In den Reihen aus positiven und negativen Gliedern von endlicher Summe kann man die Summanden beliebig vertauschen und willkürlich in Gruppen zusammenfassen, ohne das Resultat der Summation zu ändern.

Mit den neuen Summen rechnet man wie früher mit den aus bloß positiven Größen gebildeten Summen.

Ist ferner

$$a_1, a_2, \dots a_n, \dots$$

eine unendliche Menge positiver und negativer Größen, so sagt man wieder, die Summen

$$S_v = a_1 + a_2 + \dots + a_v \quad (v = 1, 2, \dots n \dots)$$

convergiren nach einer Größe S , wenn nach Wahl einer beliebig

kleinen positiven Größe δ ein m der Beschaffenheit zu finden ist, daß für jedes $n > m$ der absolute Betrag von $S - S_n$:

$$|S - S_n| < \delta.$$

Besitzt die unendliche Menge von Größen eine endliche Summe S , so convergiren die Größen $S_1, S_2, \dots S_n \dots$ gegen die Größe S , und convergiren umgekehrt $S_1, S_2, \dots S_n \dots$ nach S , so ist die Summe der Menge S .

Wieder kann man die aus unendlich vielen positiven und negativen Elementen zusammengesetzten Größen als Summe der Reihen einführen. —

Mit der genannten Definition der Endlichkeit einer aus entgegengesetzten Einheiten und deren Bruchtheilen gebildeten Größe sind diejenigen Reihen positiver und negativer Größen a_v und b_v ausgeschlossen, welche eine endliche Summe besitzen, ohne daß die Reihen der a_v und b_v für sich allein endliche Summen haben.

Solche Reihen, in denen $\sum a_v$ und $\sum b_v$ zugleich unendlich sein müssen, indem sonst $\sum a_v + \sum b_v$ nicht endlich sein könnte, besitzen nicht den Charakter von Summen und sollen deshalb aus der Rechnung ausgeschlossen werden. Die Additionsgesetze verlieren nämlich hier ihre Geltung. Nehmen wir so lange positive Elemente a_v , bis ihre Summe größer ist als der absolute Betrag einer vorgegebenen Größe c , und dann negative Glieder b_v , bis der absolute Betrag der neuen Summe kleiner ist als $|c|$, nehmen dann wieder positive Glieder, bis der absolute Betrag der so veränderten Summe größer ist als $|c|$ usw., so ist die Abweichung von $|c|$ nie größer als der absolute Werth des vor dem letzten Wechsel verwendeten Gliedes a_v oder b_v . Gibt es unter den Größen a_v und $|b_v|$ unendlich viele beliebig kleine, so werden die Abweichungen des absoluten Betrages der auf die genannte Weise entstehenden Summe von $|c|$ beliebig klein zu machen sein, wenn man nur hinlänglich viele Glieder a_v und b_v benützt. Sind demnach unter den Größen a_v und $|b_v|$ keine unendlich großen und nicht unendlich oft dieselben, dann kann man durch passende Anordnung der Summanden die Summen $S_1, S_2 \dots S_n \dots$ so bilden, daß diese nach jeder beliebig vorgegebenen Größe c convergiren. Die Summe der gegebenen Reihe ist also von der Anordnung der Summanden abhängig. *)

Wir schließen diese Reihen aus und behalten bloß diejenigen Reihen zurück, welche eine von der Anordnung der Summanden endliche Summe besitzen. Wir nennen sie *unbedingt* und *absolut conver-*

*) Vergl. Riemann's gesammelte Werke.

gent, indem auch die Summen der absoluten Beträge jeder endlichen Anzahl von Termen nach einer bestimmten GröÙe convergiren. —

Wir haben jetzt noch nachzusehen, ob wir den Quotienten zweier aus unendlich vielen Elementen zusammengesetzten GröÙen a und b den genannten Forderungen entsprechend definiren können.

Der Divisor b sei gleich eine aus unendlich vielen positiven Elementen gebildeten GröÙe, denn die Division von a durch eine rationale ZahlengröÙe $b = \frac{\alpha}{\beta}$ besteht einfach in der Multiplication von a mit $\frac{\beta}{\alpha}$, indem dann die neue GröÙe $\frac{a}{b}$ wirklich den Forderungen gemäß definirt ist.

Es sei $b = p + q$ und hierin p zwar größer als q , aber doch nur ein aus einer endlichen Anzahl von Elementen gebildeter Bestandteil von p . Der Dividend sei auch positiv.

Hierauf nehmen wir die folgenden Transformationen vor:

$$\begin{aligned} \frac{a}{p+q} &= \frac{a}{p} + \left(\frac{a}{p+q} - \frac{a}{p} \right) = \frac{a}{p} - \frac{aq}{p(p+q)}, \\ -\frac{aq}{p(p+q)} &= -\frac{aq}{p^2} - \left(\frac{aq}{p(p+q)} - \frac{aq}{p^2} \right) = -\frac{aq}{p^2} + \frac{aq^2}{p^2(p+q)}, \\ \frac{aq^2}{p^2(p+q)} &= \frac{aq^2}{p^3} + \left(\frac{aq^2}{p^2(p+q)} - \frac{aq^2}{p^3} \right) = \frac{aq^2}{p^3} - \frac{aq^3}{p^3(p+q)}, \\ &\dots \\ (-1)^n \frac{aq^n}{p^n(p+q)} &= (-1)^n \frac{aq^n}{p^{n+1}} + (-1)^n \left(\frac{aq^n}{p^n(p+q)} - \frac{aq^n}{p^{n+1}} \right) \\ &= (-1)^n \frac{aq^n}{p^{n+1}} + (-1)^{n+1} \frac{aq^{n+1}}{p^{n+1}(p+q)} \\ &\dots \end{aligned}$$

und erhalten für $\frac{a}{p+q}$ die Reihe:

$$\frac{a}{p} - \frac{a}{p} \frac{q}{p} + \frac{a}{p} \frac{q^2}{p^2} - \dots + (-1)^n \frac{a}{p} \frac{q^n}{p^n} + \dots$$

Wir müssen aber zeigen, daß diese formal gebildete Reihe unendlich vieler bestimmter Glieder eine bestimmte Bedeutung hat, also die Summe jeder endlichen (sonst beliebigen) Anzahl von Gliedern kleiner ist als eine angebbare GröÙe, und daß die Multiplication der neu gebildeten GröÙe mit $(p+q)$ a gibt, denn dann haben wir die Division durch $p+q = b$ oder die GröÙe $\frac{a}{b}$ unseren Forderungen gemäß definirt.

Betrachten wir allgemein eine Reihe

$$a_0 + a_1 c + a_2 c^2 + \dots + a_n c^n + \dots,$$

in der die positiven GröÙen a_r rational sind und der absolute Betrag

der rationalen GröÙe c kleiner ist als Eins, und vergleichen sie mit einer Reihe

$$a + ac + ac^2 + \dots + ac^n + \dots,$$

wo a gröÙer ist als jede der GröÙen a_v . Die Summe der ersten Reihe ist gewiß kleiner als die der zweiten, denn jeder Bestandtheil jener gehört auch dieser an. Die Summe der ersten n Glieder der ersten Reihe ist nicht gröÙer als

$$a + ac + ac^2 + \dots + ac^{n-1} = a \frac{1-c^n}{1-c}$$

und der absolute Betrag jener Summe ist kleiner als die endliche ZahlengröÙe

$$\frac{a}{1-c}.$$

Das gilt für jedes n , daher ist die Summe der ersten Reihe endlich.

Bestehen die GröÙen a_v und c aus unendlich vielen Elementen, so bestimme man zwei positive rationale GröÙen α und γ , derart daß

$$\alpha > a_v \quad (v = 1, 2, \dots) \quad \text{und} \quad 1 > \gamma > |c|,$$

wo $|c|$ den absoluten Betrag von c bezeichnet. Dann ist der absolute Betrag jedes Gliedes $a_v c^v$

$$|a_v c^v| < \alpha \gamma^v$$

und der absolute Betrag der Summe einer endlichen Anzahl von Gliedern der vorgelegten Reihe wird wieder kleiner als

$$\frac{\alpha}{1-\gamma},$$

d. h. auch jetzt ist die Reihe $\sum_{v=0,1,2,\dots} a_v c^v$ endlich.

Die Anwendung dieser Betrachtungen auf die oben gebildete Reihe

$$\frac{a}{p} + \frac{a}{p} \left(-\frac{q}{p}\right) + \frac{a}{p} \left(-\frac{q}{p}\right)^2 + \dots + \frac{a}{p} \left(-\frac{q}{p}\right)^n + \dots,$$

deren Glieder immer kleiner und kleiner werden, lehrt unmittelbar, daß sie eine endliche Summe besitzt. —

Das Product der Reihe und $(p+q)$ ist ferner gleich a , denn man kann entsprechend einem vorgelegten Bestandtheile von a ein n so bestimmen, daß auch die Summe

$$(p+q) \cdot \sum_{v=1}^n \frac{a}{p} \left(-\frac{q}{p}\right)^{v-1} = (p+q) \cdot \frac{a}{p} \frac{1 - \left(-\frac{q}{p}\right)^n}{1 - \left(-\frac{q}{p}\right)}$$

oder

$$a \left(1 - \left(-\frac{q}{p}\right)^n\right)$$

diesen Bestandtheil besitzt, und umgekehrt ist jeder Bestandtheil des Productes in a enthalten.

Die Änderungen in den Annahmen, b sei negativ, a positiv oder negativ, bedürfen gewiß keiner Besprechung mehr und wir können sagen, daß wir für die aus unendlich vielen positiven und negativen Elementen zusammengesetzten endlichen Größen die arithmetischen Operationen den Forderungen gemäß definirt haben und berechtigt sind, die neuen Größen als Summen unendlicher Reihen in die Rechnung aufzunehmen.

§ 7. Zweite Definitionsform der irrationalen Zahlengrößen.

Zur Begründung der neuen Größen, die wir *irrationale Zahlengrößen* nennen, wenn sie nicht wie die Reihe $\sum_{v=1,2,\dots} \frac{3}{10^v}$ mit rationalen

Größen übereinkommen, wurden wir veranlaßt, als die Forderung gestellt war, die rationalen Zahlengrößen in einer bestimmten Form darzustellen. Man wird zu den neuen Größen bei vielen anderen Aufgaben gedrängt. Fragt man z. B. nach einer Größe x , welche die Eigenschaft hat, mit sich selbst multiplicirt eine positive rationale Zahlengröße A zu geben, so stellt sich heraus, daß unter den rationalen Zahlengrößen keine der verlangten Art existirt, wenn A nicht selbst die zweite Potenz einer solchen ist.

Gibt es eine rationale Größe $x = \frac{p}{q}$, derart daß

$$\frac{p}{q} \cdot \frac{p}{q} = A = \frac{a}{b}$$

ist, wo a und b und ebenso p und q ohne gemeinsamen Theiler vorzusetzen sind, auf daß auch p^2 und q^2 keinen gemeinsamen Theiler besitzen, so ist

$$p^2 b = q^2 a.$$

Weil hier p^2 und a , q^2 und b wechselweise durcheinander theilbar sein müssen, zerfällt die letzte Gleichung in die folgenden

$$p^2 = a, \quad q^2 = b,$$

und man hat nur mehr Größen p und q zu suchen, die mit sich selbst multiplicirt die ganzen Zahlen a respective b geben.

Ist α eine bestimmte ganze Zahl gleich oder größer als 2, so schreiben wir zunächst die ganze Zahl $a \geq \alpha$ in der Form:

$$c_0 \alpha^m + c_1 \alpha^{m-1} + \dots + c_m,$$

worin c_0, c_1, \dots, c_m Zahlen aus der Folge $0, 1, 2, \dots, \alpha - 1$ bezeichnen. Das Verfahren zur Ermittlung einer Größe p , welche der Gleichung $pp = a$ genügt, besteht dann darin, daß man zuerst die größte Zahl α_1 der Form $\beta_1 \alpha^\mu$ ($\beta_1 < \alpha$) sucht, für welche

$$a - \alpha_1^2 > 0$$

ist, dann die größte Zahl α_2 der Form $\beta_2 \alpha^{\mu-1}$ ($\beta_2 > \alpha$), derart daß

$$a - (\alpha_1 + \alpha_2)^2 > 0$$

wird usw.

Wenn es keine rationale Zahl

$$p = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_r = \beta_1 \alpha^\mu + \beta_2 \alpha^{\mu-1} + \dots + \beta_{\mu+1}$$

der verlangten Beschaffenheit gibt, oder — wie man sagt — keine rationale zweite Wurzel aus a , so läßt sich das angegebene Verfahren unbegrenzt fortsetzen und die successive gewonnenen rationalen Größen

$$p_1 = \alpha_1, \quad p_2 = \alpha_1 + \alpha_2, \quad \dots \quad p_n = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n, \quad \dots$$

haben die Eigenschaft, die von p geforderte Beschaffenheit immer genauer und genauer zu erfüllen, indem die Differenzen

$$a - p_1^2, \quad a - p_2^2, \quad \dots \quad a - p_n^2, \quad \dots$$

immer kleiner und kleiner werden. Zu einer beliebig kleinen positiven GröÙe δ kann man aber ein m so bestimmen, daß die Differenz jedes auf p_m folgenden Gliedes $p_{m+\mu}$ der unbegrenzt fortsetzbaren Reihe

$$p_1, p_2, \dots p_n \dots$$

und p_m selber kleiner wird als δ .

Wir betrachten allgemeiner eine unendliche Menge rationaler Größen

$$a_1, a_2, \dots a_n, \dots$$

und setzen fest, daß zu jeder beliebig klein gewählten positiven (rationalen) GröÙe δ nur eine endliche Anzahl ($m - 1$) von Gliedern der Folge ($a_1, a_2, a_3 \dots$) gehöre, derart daß die übrigen Glieder paarweise eine dem absoluten Betrage nach kleinere Differenz besitzen, als δ anzeigt. Eine solche Reihe von Größen mit der Eigenschaft

$$|a_{n+\nu} - a_n| < \delta \quad \left(\begin{array}{l} n \geq m \\ \nu = 1, 2, \dots \end{array} \right)$$

heißt eine *Fundamentalreihe* und speciell eine *Elementarreihe*, wenn die absoluten Beträge der Größen a_n mit wachsendem Index n unter jede noch so kleine positive GröÙe herabsinken. *)

Aus diesen Definitionen geht hervor, daß die absoluten Beträge der Glieder einer Fundamentalreihe stets kleiner bleiben als eine endliche GröÙe und größer als eine von Null verschiedene GröÙe.

Eine Reihe endlich bleibender Größen a_ν , deren absolute Beträge von einem bestimmten m ab niemals abnehmen, ist eine Fundamentalreihe.

Wäre nämlich die Eigenschaft

$$|a_{n+\nu} - a_n| < \delta$$

nicht erfüllt, so müßten die absoluten Beträge $|a_\nu|$ mit wachsendem

*) Vergl. Heine's Abhandlung in Crelle's J. Bd. 74.

ν größer werden als jede angebbare GröÙe, und das widerspricht der Voraussetzung.

Derselbe Satz gilt auch für Reihen endlicher GröÙen, deren absolute Beträge von einem bestimmten m ab niemals zunehmen.

Zugleich mit zwei Reihen

$$a_1, a_2, \dots a_n, \dots$$

$$b_1, b_2, \dots b_n, \dots$$

sind auch die folgenden

$$a_1 + b_1, \quad a_2 + b_2, \quad \dots \quad a_n + b_n, \quad \dots$$

$$a_1 - b_1, \quad a_2 - b_2, \quad \dots \quad a_n - b_n, \quad \dots$$

$$a_1 b_1, \quad a_2 b_2, \quad \dots \quad a_n b_n, \quad \dots$$

$$\frac{a_1}{b_1}, \quad \frac{a_2}{b_2}, \quad \dots \quad \frac{a_n}{b_n}, \quad \dots$$

Fundamentalreihen, denn es ist

$$|(a_{n+\nu} + b_{n+\nu}) - (a_n + b_n)| = |(a_{n+\nu} - a_n) + (b_{n+\nu} - b_n)|$$

$$|(a_{n+\nu} - b_{n+\nu}) - (a_n - b_n)| = |(a_{n+\nu} - a_n) - (b_{n+\nu} - b_n)|$$

$$|a_{n+\nu} b_{n+\nu} - a_n b_n| = |b_{n+\nu} (a_{n+\nu} - a_n) - a_n (b_{n+\nu} - b_n)|$$

$$\left| \frac{a_{n+\nu}}{b_{n+\nu}} - \frac{a_n}{b_n} \right| = \left| \frac{b_{n+\nu} (a_{n+\nu} - a_n) - a_n (b_{n+\nu} - b_n)}{b_{n+\nu} b_n} \right|$$

und die rechten Seiten dieser Gleichungen sind beliebig klein zu machen. Bloss in der vierten Reihe dürfen die GröÙen b_ν keine Elementarreihe bilden.

Zwei Fundamentalreihen heißen gleich, wenn die zugehörige Reihe

$$a_1 - b_1, \quad a_2 - b_2, \quad \dots \quad a_n - b_n, \quad \dots$$

eine Elementarreihe ist.

Darnach sind alle Elementarreihen gleich und niemals kann eine Elementarreihe einer Fundamentalreihe gleich sein, weil die aus beiden entstehende Reihe mit dem allgemeinen Gliede $a_\nu - b_\nu$ keine Elementarreihe sein kann.

Jeder Fundamentalreihe ordne man eine durch sie zu definierende GröÙe zu, d. h. man denke durch die Fundamentalreihe ein neues Ding gesetzt, und suche auf Grund von Definitionen den Vergleich desselben mit den rationalen ZahlengröÙen zu bewerkstelligen.

Wir nennen dieses neue Object jetzt schon GröÙe und definiren hierauf:

Die gleichen Fundamentalreihen zugeordneten GröÙen heißen gleich. Zu Fundamentalreihen, deren Glieder a_ν alle gleich a sind, ordne man a selbst zu.

Darnach gehört zu jeder Elementarreihe die GröÙe Null, denn die den Elementarreihen zugeordneten GröÙen sind einander gleich und der besonderen Elementarreihe $(0, 0, \dots)$ ist die Null zuzuordnen.

Unter dem *absoluten Betrage* der der Fundamentalreihe (a_1, a_2, \dots) zugeordneten GröÙe versteht man die zu der neuen Fundamentalreihe $(|a_1|, |a_2|, \dots)$ gehörige GröÙe.

Der absolute Betrag der einer Reihe (a_1, a_2, \dots) zugeordneten GröÙe a heißt *größer* oder *kleiner* als der absolute Betrag der einer zweiten Reihe (b_1, b_2, \dots) zugehörigen GröÙe b , jenachdem die Differenzen $|a_n| - |b_n|$ von einem bestimmten n ab stets positiv oder negativ bleiben.

LäÙt man in einer Fundamentalreihe (a_1, a_2, \dots) eine beliebige aber endliche Anzahl von Gliedern fort, so ist die der neuen Reihe

$$a_1', a_2', \dots a_n' \dots$$

zugeordnete GröÙe gleich der der ersten zugehörigen GröÙe, denn

$$a_1 - a_1', a_2 - a_2', \dots a_n - a_n' \dots$$

ist eine Elementarreihe.

Man kann jetzt sagen, daÙ die einer Fundamentalreihe zugehörige GröÙe a ist, wenn die Terme von einem bestimmten endlichen ab gleich a sind.

Nach diesen Definitionen, durch welche der Begriff der neuen GröÙe fixiert ist, fragt es sich, ob und wie man für dieselben die arithmetischen Grundoperationen zu definieren hat, damit unsere früher gestellten Forderungen auch hier erfüllt werden.

Man definiere die Rechnungsoperationen durch die Fundamentalreihen; und zwar verstehe man unter den GröÙen

$$a + b, a - b, ab, \frac{a}{b},$$

wo a und b die den Reihen (a_1, a_2, \dots) resp. (b_1, b_2, \dots) zugeordneten GröÙen bedeuten, diejenigen, welche der Reihe nach zu den neuen Fundamentalreihen

$$(a_1 + b_1, a_2 + b_2, \dots), (a_1 - b_1, a_2 - b_2, \dots)$$

$$(a_1 b_1, a_2 b_2, \dots), \left(\frac{a_1}{b_1}, \frac{a_2}{b_2}, \dots\right)$$

gehören.

Dann haben die Gleichungen

$$a + b = c, a - b = c, ab = c, \frac{a}{b} = c$$

die bestimmte Bedeutung: die Fundamentalreihen, zu welchen die GröÙen auf beiden Seiten gehören, sind gleich.

Man beweist leicht die Giltigkeit der arithmetischen Grundgesetze und ebenso die Richtigkeit der aus den letzten Gleichungen entstehenden Beziehungen:

$$a = c - b, a = c + b, a = \frac{c}{b}, a = bc.$$

Wenngleich wir bereits zu beurtheilen im Stande sind, ob eine rationale Zahlengröße gleich, größer oder kleiner ist als die einer Fundamentalreihe (a_1, a_2, \dots) zugeordnete Größe, müssen wir das Verhalten der neuen Größen zu den rationalen noch genauer untersuchen.

Wenn man zu einer unendlichen Menge rationaler Zahlengrößen a_1, a_2, \dots eine rationale Zahlengröße α so angeben kann, daß der absolute Betrag $|\alpha - a_n|$ mit wachsendem n kleiner wird als jede noch so kleine positive Größe δ , dann heißt α *der limes oder die Grenze der Größen a_n* .

Besitzen darnach die Glieder einer Fundamentalreihe eine rationale Grenze α , so ist α die der Reihe zugeordnete Größe a , denn

$$\alpha - a_1, \alpha - a_2, \dots$$

ist zufolge der Definition der Grenze eine Elementarreihe. Jetzt ist

$$\alpha - a = 0, \quad \alpha = a \quad \text{oder} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a,$$

wenn die Grenze der Größen a_n bei wachsendem n mit $\lim a_n$ bezeichnet wird, und ∞ das Zeichen dafür ist, daß n unbeschränkt in's Unendliche wachsen soll. —

Wir finden also, die Grenze $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ existirt und ist gleich a .

Um diesen Satz verallgemeinern zu können, schicken wir wieder eine Definition voraus.

Man sagt, die Glieder einer unendlichen Menge von Größen

$$a_1, a_2, \dots a_n, \dots,$$

die der Reihe nach den Fundamentalreihen

$$(a_1^{(n)}, a_2^{(n)}, \dots a_m^{(n)} \dots) \quad (n = 1, 2, \dots)$$

zugeordnet sein mögen, sinken mit wachsendem n unter jeden angebbaren Werth herab, wenn zu einer beliebig kleinen von Null verschiedenen positiven Größe δ stets ein $n = m$ so bestimmt werden kann, daß

$$|a_{n+m}|$$

für jedes n kleiner wird als δ , sobald $n \geq m$ ist.

Hier kann die Größe δ eine rationale Größe sein, oder zu einer Fundamentalreihe $(\delta_1, \delta_2, \dots \delta_\mu \dots)$ gehören. Die Fundamentalreihen zugeordneten Größen umfassen die rationalen, und wenn dann die Größenmenge (a_1, a_2, \dots) für alle rationalen δ die genannte Eigenschaft besitzt, besteht sie auch für Größen δ , welche den aus den rationalen Größen δ_μ gebildeten Fundamentalreihen zugeordnet sind. In der That: es gibt eine positive rationale Zahlengröße d , die kleiner ist als die Größen δ_{n+m} , wenn nur n hinlänglich groß gewählt ist, denn die δ_μ sinken nicht unter jeden Werth herab. Werden nun die Größen $|a_{n+m}|$ und $|a_\mu^{(n+m)}|$ kleiner als d , so bleiben

$$d = |a_\mu^{(n+\nu)}| \quad \text{und} \quad \delta_\mu = |a_\mu^{(n+\nu)}|$$

gleichzeitig positiv, w. z. b. w.

Ist jetzt α die einer Fundamentalreihe zugeordnete Gröfse und sinken die absoluten Beträge der Gröfsmenge

$$\alpha - a_1, \quad \alpha - a_2, \quad \dots \quad \alpha - a_\nu \dots$$

unter jede noch so kleine positive Gröfse δ , so heifst α wieder die Grenze der a_ν .

Daraus folgt, dafs α gerade die Grenze der Terme jener Reihe ($a_1, a_2, \dots a_\nu \dots$) ist, welcher α zugehört, denn

$$\alpha - a_1, \quad \alpha - a_2, \quad \dots \quad \alpha - a_n \dots$$

sinken für hinlänglich grofse n unter jeden Werth δ herab. $\lim_{\nu=\infty} \alpha_\nu$ existirt und ist gleich α . —

Bei einem Rückblick bemerken wir nun, dafs uns bei der Einführung der den Fundamentalreihen zugeordneten Gröfsen a ganz dieselben Aufgaben begegnen wie bei den gebrochenen und negativen Gröfsen. In Folge neuer Aufforderungen werden neue Gröfsen definirt und deren Eigenschaften untersucht und endlich deren Rechnungsregeln ermittelt. Hier ist

$$\lim_{\nu=\infty} a_\nu = a$$

die besondere Rechnungsregel, wie z. B. $(-1)(-1) = 1$ eine war.

In dem vorigen Paragraphen nahmen wir die aus einer unendlichen Menge endlicher rationaler Zahlengröfsen (unter denen keine unendlich oft vorkommt) zusammengesetzten Gröfsen auf, setzten aber fest, dafs sie nicht jede rationale Gröfse als Bestandtheil enthalten, dann konnten wir diese Gröfsen mit den rationalen und untereinander vergleichen, konnten für dieselben die Addition und Multiplication den Forderungen gemäß definiren, und nachdem so — wie Georg Cantor sagt — „die neue Gröfse vermöge der ihr durch die Definitionen gegebenen Beschaffenheit eine bestimmte Realität in unserem Geiste erhalten“ hatte, liefs sich dieselbe als Summe unendlich vieler Gröfsen in die Rechnung einführen, denn diese Summe war dadurch zu definiren, dafs man sie der neuen Gröfse gleich setzt.

Die durch die Fundamentalreihen gewonnenen Zahlengröfsen sind keine anderen als die durch die Zusammensetzung unendlich vieler bestimmter rationaler Gröfsen definirten Gröfsen.

Da nämlich in der unendlichen Reihe

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n + \dots$$

kein Element $\frac{1}{m_\nu}$ unendlich oft vorkommen darf, so können die absoluten Beträge der Terme a_n nicht beständig wachsen, sondern sie müssen von einem bestimmten ab beständig abnehmen. Es gibt also

unter den Größen $|a_n|$ unendlich viele, die kleiner sind als eine beliebig kleine GröÙe δ . — Weil ferner der absolute Betrag der Summe jeder beliebigen aber endlichen Anzahl von Gliedern kleiner bleiben muß als eine angebbare GröÙe g , so kann man nach Annahme einer beliebig kleinen GröÙe δ stets eine ganze Zahl n derart angeben, daß der absolute Betrag

$$|a_{m+1} + a_{m+2} + \dots + a_{m+\mu}|$$

für jedes μ kleiner wird als δ , sobald nur $m \geq n$ ist.

Darum ist die Reihe der Größen

$$S_1 = a_1, \quad S_2 = a_1 + a_2, \quad \dots \quad S_n = a_1 + a_2 + \dots + a_n, \quad \dots$$

eine Fundamentalreihe und die derselben zugeordnete GröÙe S ist gerade die Summe der Reihe

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n + \dots,$$

denn es gilt $S = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n$, und $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n$ ist diejenige GröÙe, nach welcher

$S_1, S_2, \dots, S_n, \dots$ convergiren, d. h. die Summe der Reihe.

Es entsteht nun noch die Frage, ob mit Hilfe der rationalen und irrationalen Zahlengrößen a und b auch andere Größen zu definiren sind, indem man den Fundamentalreihen aus rationalen und irrationalen Größen neue Größen c zuordnet und ob derselbe Fortgang fernerhin zu neuen Größen führt oder nicht.

Man sieht leicht, daß man einer Reihe

$$b_1, b_2, \dots, b_n, \dots$$

stets eine Fundamentalreihe aus rationalen Zahlengrößen a so zuordnen kann, daß

$$b_1 - a_1, \quad b_2 - a_2, \quad \dots, \quad b_n - a_n, \quad \dots$$

eine Elementarreihe wird, darum ist die der ersten Reihe zugeordnete GröÙe b gleich der zu der zweiten Reihe zugeordneten irrationalen GröÙe a ; man erhält also keine neuen Größen c .

Indeß aber das Gebiet der rationalen Größen a und das durch die Fundamentalreihen dieser definirte Gebiet von Größen b in derartiger Beziehung steht, daß jedes a unter den b vorkommt und nicht jedes b in dem Gebiete a enthalten ist, wird nicht allein jedes b unter den c , sondern auch jedes c unter den b vorkommen. —

Trotz dieser gegenseitigen Deckung der Zahlengebiete b und c spricht man von Zahlengrößen c *zweiter Ordnung* gegenüber den dem Gebiete angehörigen (rationalen und irrationalen) Größen der ersten Ordnung, dann von Größen dritter und n^{ter} Ordnung, wenn sie aus den Größen der ersten zwei oder $(n - 1)$ Gebiete gebildet sind, obgleich nirgends mehr neue Größen durch Fundamentalreihen hervorgehen, die nicht in dem Gebiete b enthalten wären. —

. Diese Bemerkung werden wir später verwerten. —

Jetzt gehen wir auf die Bestimmung der Zahlengröße zurück, welche mit sich selbst multiplicirt eine positive rationale Zahlengröße a ergeben sollte, die wir mit \sqrt{a} bezeichnen. Da das oben angedeutete Verfahren zu der Bestimmung von x eine Folge von rationalen Größen lieferte, welche die Eigenschaft von x immer näher und näher erfüllte, die Folge aber eine Fundamentalreihe war, so ist x die Grenze ihrer Glieder und eine rationale oder irrationale Zahlengröße. Neben $x = \sqrt{a}$ hat die entgegengesetzte Zahlengröße $-\sqrt{a}$ dieselbe Eigenschaft wie \sqrt{a} , d. h. es ist

$$(-\sqrt{a}) \cdot (-\sqrt{a}) = a.$$

Selbstverständlich existirt auch $x = \pm \sqrt{a}$, wenn a eine irrationale positive Zahlengröße ist.

Der Bestimmung der zweiten Wurzel aus einer positiven Zahlengröße entnehmen wir die Bemerkung, daß wir bei der Berechnung einer Größe von verlangter Eigenschaft die Aufmerksamkeit auf die Entdeckung eines Verfahrens zu richten haben, durch welches eine Größenreihe bestimmt wird, welche eine Fundamentalreihe constituirte, deren Glieder die Eigenschaft der gesuchten Größe mit immer größerer Annäherung erfüllen.

Die Grenze der Fundamentalreihe ist die gesuchte Größe.

§ 8. Aus mehreren Haupteinheiten zusammengesetzte Größen.

Mit der Bildung der rationalen und irrationalen Zahlengrößen haben wir einen gewissen Abschluß erreicht, indem die Wiederholung der vier Rechnungsarten der Addition, Multiplication und den inversen Operationen der Subtraction und Division mit den gefundenen Größen keine neuen Zahlengrößen erzeugt. (Die Producte unendlich vieler Factoren werden wir später betrachten.) Wir finden aber in vielen Aufgaben die Aufforderung zur Gründung neuer Zahlengrößen, wenn sie in den bisherigen Größen noch nicht lösbar sind, wie z. B. in der Aufgabe, x unter der Bedingung $b - \left(\frac{a}{2}\right)^2 > 0$ so zu bestimmen, daß die Gleichung $x^2 + ax + b = 0$ besteht.

Anstatt die Einführung neuer Größen an eine besondere Aufgabe zu knüpfen und darnach zu zeigen, warum wir mit dem gewonnenen System von Größen das Gebiet derjenigen Zahlengrößen abzuschließen haben, welche unsere stets eingeführte Forderung erfüllen, daß sich nämlich für die neuen Größen die arithmetischen Grundoperationen den Verknüpfungsregeln ganzer Zahlen entsprechend definiren lassen, wollen wir die direct auf den Abschluß gerichtete letzte denkbare Verallgemeinerung bei der Bildung neuer Größen vornehmen, indem

wir auch noch aus mehreren Grundelementen und deren Bruchtheilen zusammengesetzte Größen einführen.

Setzen wir in den aus der positiven und negativen Einheit und deren Bruchtheilen gebildeten Zahlengrößen

$$\xi = \sum_v \frac{1}{m_v},$$

wo m_v eine positive oder negative ganze Zahl bedeutet, an Stelle des Grundelementes 1 das unbestimmte e , so sind die aus diesem Elemente gebildeten Zahlengrößen der bisherigen Art durch

$$\xi e = \sum_v \frac{e}{m_v}$$

repräsentirt. Wir nennen sie Zahlengrößen mit einem *Hauptelement* oder einer *Haupteinheit* e .

Indem wir Zahlengrößen, die aus zwei entgegengesetzten Grundelementen e und e' und deren Theilen e_n und e'_n gebildet sind, stets so umformen können, daß sie die genannte Gestalt erhalten, fragen wir, ob es aus mehreren Hauptelementen e_1, e_2, \dots, e_n zusammengesetzte Größen

$$\xi_1 e_1 + \xi_2 e_2 + \dots + \xi_n e_n$$

gibt, für die sich die Grundoperationen so definiren lassen, daß zugleich mit a und b auch $a + b$, $a - b$, ab , $\frac{a}{b}$ Größen der Gesamtheit der aus denselben n Hauptelementen gebildeten Größen sind und daß die für die Zahlengrößen aus einer Haupteinheit bestehenden arithmetischen Gesetze ihre Giltigkeit behalten.

Aus den Gesetzen der Rechnungsoperationen ganzer Zahlen ist dann abzuleiten, wie sich das Rechnungsverfahren der neuen complexen Größen gestaltet.

Zwei complexe Größen

$$a = \sum_{v=1}^n \alpha_v e_v, \quad b = \sum_{v=1}^n \beta_v e_v,$$

wo die griechischen Buchstaben Zahlengrößen aus einer Haupteinheit bezeichnen sollen, sind gleich, wenn sie dieselben Einheiten und deren gleiche Bruchtheile in gleicher Anzahl enthalten, wenn also die n Gleichungen

$$\alpha_v = \beta_v \quad (v = 1, 2 \dots n)$$

bestehen.

Die in den Gleichungen

$$a + b = b + a, \quad (a + b) + c = (a + c) + b, \quad (a - b) + b = a$$

ausgesprochenen Gesetze verlangen, daß man die Summe $a + b$ und die Differenz $a - b$ durch die Formeln definiert:

$$a + b = \sum_{v=1}^n (\alpha_v + \beta_v) e_v, \quad a - b = \sum_{v=1}^n (\alpha_v - \beta_v) e_v.$$

Es soll auch ab eine aus den Einheiten $(e_1, e_2 \dots e_n)$ gebildete complexe GröÙe c sein:

$$c = \sum_{v=1}^n \gamma_v e_v,$$

und zwar soll sie dadurch abgeleitet werden, daÙ man die Gesetze der Multiplication ganzer Zahlen auf a und b anwendet.

Daraus folgt

$$ab = \sum_{\mu=1}^n \sum_{v=1}^n (a_\mu e_\mu) (b_v e_v) = \sum_{\mu} \sum_v (a_\mu b_v) (e_\mu e_v),$$

und indem das Product zweier Einheiten $e_\mu e_v$ ebenfalls eine complexe GröÙe der Form

$$\sum_{\lambda=1}^n \varepsilon_{\mu, v}^{(\lambda)} e_\lambda$$

sein soll, ergibt sich

$$ab = \sum_{\mu, v, \lambda} (a_\mu b_v \varepsilon_{\mu, v}^{(\lambda)}) e_\lambda,$$

wo unter $\sum_{\mu, v, \lambda}$ das Zeichen $\sum_{\mu} \sum_v \sum_{\lambda}$, also eine dreifache Summe zu verstehen ist.

Da die Gleichungen

$$e_\mu e_v = e_v e_\mu, \quad (e_\mu e_v) e_\lambda = (e_\mu e_\lambda) e_v \quad (\mu, v, \lambda = 1, 2 \dots n)$$

bestehen, sind die GröÙen $\varepsilon_{\mu, v}^{(\lambda)}$ an Bedingungsgleichungen gebunden, und zwar führen die ersten Gleichungen zu den Bedingungen

$$\varepsilon_{\mu, v}^{(\lambda)} = \varepsilon_{v, \mu}^{(\lambda)},$$

die zweiten auf die Gleichungen

$$\sum \varepsilon_{\mu, v}^{(\lambda)} \varepsilon_{\mu', \lambda'}^{(\lambda')} = \sum \varepsilon_{v', v}^{(\lambda)} \varepsilon_{\mu', \mu}^{(\lambda')}.$$

Im Falle $n=2$ lauten diese Gleichungen mit Rücksicht auf die ersten:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11}^{(3)} \varepsilon_{22}^{(1)} - \varepsilon_{12}^{(3)} \varepsilon_{12}^{(1)} &= 0 \\ \varepsilon_{12}^{(3)} (\varepsilon_{11}^{(1)} - \varepsilon_{12}^{(3)}) - \varepsilon_{11}^{(3)} (\varepsilon_{12}^{(1)} - \varepsilon_{22}^{(3)}) &= 0 \\ \varepsilon_{22}^{(1)} (\varepsilon_{11}^{(1)} - \varepsilon_{12}^{(3)}) - \varepsilon_{12}^{(1)} (\varepsilon_{12}^{(1)} - \varepsilon_{22}^{(3)}) &= 0. \end{aligned}$$

Den angegebenen Bedingungsgleichungen kann man aber bei jedem $n \geq 2$ noch durch unendlich viele Werthsysteme für $\varepsilon_{\mu, v}^{(\lambda)}$ genügen.

In dem Falle $n=2$ setze man nur

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11}^{(1)} - \varepsilon_{12}^{(2)} &= \pi \sigma & \varepsilon_{12}^{(1)} - \varepsilon_{22}^{(2)} &= \pi' \sigma \\ \varepsilon_{12}^{(1)} &= \pi \varrho & \varepsilon_{22}^{(1)} &= \pi' \varrho \\ \varepsilon_{11}^{(2)} &= \pi \tau & \varepsilon_{12}^{(2)} &= \pi' \tau,\end{aligned}$$

dann folgt:

$$\begin{aligned}e_1 e_1 &= (\pi \sigma + \pi' \tau) e_1 + \pi \tau e_2 \\ e_1 e_2 &= e_2 e_1 = \pi \varrho e_1 + \pi' \tau e_2 \\ e_2 e_2 &= \pi' \varrho e_1 + (\pi \varrho - \pi' \sigma) e_2\end{aligned}$$

und hier kann man $\pi, \pi', \sigma, \varrho, \tau$ irgend welche Werthe beilegen, nur dürfen π und π' nicht gleichzeitig Null sein, sonst wären alle Größen $\varepsilon_{\mu\nu}^{(\lambda)}$ und die Producte $e_\mu e_\nu$ und ab Null.

Wenn man aber ein Werthesystem fixirt, dann ist auch das Product ab unzweideutig definirt, d. h. es ist ein Multiplicationsverfahren festgesetzt und zwar so, daß die Multiplicationsgesetze

$$ab = ba, (ab)c = (ac)b, (a+b)c = ac + bc$$

gelten.

Soll endlich noch a durch b dividirt werden, so hat man eine GröÙe

$$c = \sum_{\nu=1}^n \gamma_\nu e_\nu$$

dadurch zu bilden, daß man $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ aus der Gleichung $cb = a$ oder den n äquivalenten Gleichungen:

$$\gamma_1 \sum_{\mu} \varepsilon_{\mu 1}^{(\lambda)} \beta_\mu + \gamma_2 \sum_{\mu} \varepsilon_{\mu 2}^{(\lambda)} \beta_\mu + \dots + \gamma_n \sum_{\mu} \varepsilon_{\mu n}^{(\lambda)} \beta_\mu = \alpha_\lambda \quad (\lambda = 1, 2, \dots, n)$$

bestimmt, in denen die Größen $\varepsilon_{\mu\nu}^{(\lambda)}$ nur mit den früheren Bedingungengleichungen verträgliche Werthe annehmen.

Die Behandlung eines Systems linearer Gleichungen setzen wir hier als bekannt voraus, da die Lösung solcher Gleichungen, d. h. die Bestimmung der zu suchenden Größen $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ ohne weitere Definitionen ausführbar ist. —

Hat die Determinante Δ des Gleichungssystems einen von Null verschiedenen Werth, so lassen sich die Größen γ_ν eindeutig bestimmen, und die Division ist möglich.

Ist hingegen $\Delta = 0$, so ist die Division nur ausführbar, wenn die n Gleichungen derart zusammenhängen, daß sie auf $(n-1)$ zurückkommen, d. h. wenn zwischen den Größen $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ eine bestimmte Beziehung besteht. Doch dann gibt es unendlich viele Werthe für die Größen γ_ν und der Quotient $\frac{a}{b}$ hat unendlich viele Werthe.

Um diesen Fall auszuschließen, müssen wir festsetzen, daß die Determinante Δ nicht für beliebige Werthe von $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ (oder identisch) verschwindet. Doch wenn selbst die Größen $\varepsilon_{\mu\nu}^{(\lambda)}$ solche

Werthe haben, daß Δ nicht für ein beliebiges Werthesystem $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ Null wird, kann es trotzdem specielle Werthesysteme und specielle Größen b geben, für die Δ verschwindet. Wählt man aber die Größen $\varepsilon_{\mu\nu}^{(1)}$ allen genannten Bedingungen gemäß, setzt $a=0$ oder $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = 0$ und bestimmt hierauf die Größen $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, derart, daß $\Delta = 0$ ist, so kann man für die Größen γ , unendlich viele Werthe angeben, welche den Gleichungen

$$\sum_{\nu=1}^n (\gamma_\nu \sum_{\mu=1}^n \varepsilon_{\mu\nu}^{(1)} \beta_\mu) = 0 \quad (\lambda = 1, 2, \dots, n)$$

genügen, und zu jedem Werthesystem gehört dann eine GröÙe c der Beschaffenheit, daß das Product unseres speciellen b und c Null ist, ohne daß ein Factor verschwindet.

Deshalb heißt eine solche specielle GröÙe b ein *Theiler der Null*.

In der Theorie der Zahlengrößen aus einer Haupteinheit konnte man nur der Null unendlich viele Größen γ gleicher Art zuordnen, so daß

$$0 \cdot \gamma = 0$$

ist, es war also nur die Null ein Theiler der Null, oder ein Product konnte nicht verschwinden, wenn nicht einer der Factoren Null war.

Will man diesen Satz in der Theorie der aus mehreren Haupteinheiten zusammengesetzten Größen erhalten sehen, so muß man offenbar den Größen $\varepsilon_{\mu\nu}^{(2)}$ noch derartige Beschränkungen auferlegen, daß Δ nur für $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 0$ verschwindet. Wir thun dies in dem Falle zweier Einheiten e_1 und e_2 . — Da lauten die Bestimmungsgleichungen für die Größen γ_1 und γ_2 mit Rücksicht auf die bei der Multiplication eingeführten Bedingungen für die Größen $\varepsilon_{\mu\nu}^{(2)}$:

$$\begin{aligned} \gamma_1 [(\pi\sigma + \pi'\tau)\beta_1 + \pi\varrho\beta_2] + \gamma_2 [\pi\varrho\beta_1 + \pi'\varrho\beta_2] &= \alpha_1 \\ \gamma_1 [\pi\tau\beta_1 + \pi'\tau\beta_2] + \gamma_2 [\pi'\tau\beta_1 + (\pi\varrho - \pi'\sigma)\beta_2] &= \alpha_2. \end{aligned}$$

Die Determinante dieses Gleichungssystems wird

$$\Delta = (\tau\pi'^2 + \sigma\pi\pi' - \varrho\pi^2) \cdot [\tau\beta_1^2 - \sigma\beta_1\beta_2 - \varrho\beta_2^2]$$

und die Auflösungen heißen:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{1}{\Delta} \{ [\pi'\tau\beta_1 + (\pi\varrho - \pi'\sigma)\beta_2] \alpha_1 - [\pi\varrho\beta_1 + \pi'\varrho\beta_2] \alpha_2 \} \\ \gamma_2 &= \frac{-1}{\Delta} \{ [\pi\tau\beta_1 + \pi'\tau\beta_2] \alpha_1 - [(\pi\sigma + \pi'\tau)\beta_1 + \pi\varrho\beta_2] \alpha_2 \}. \end{aligned}$$

Da nun Δ nicht identisch oder für jedes beliebige Werthepaar (β_1, β_2) Null sein soll, darf der von β_1 und β_2 freie Factor

$$\delta = \tau\pi'^2 + \sigma\pi\pi' - \varrho\pi^2$$

nicht verschwinden. Mit dieser Bedingung ist das identische Verschwinden unserer Determinante ausgeschlossen, denn offenbar kann

der zweite Factor von Δ nur dann für jedes Werthepaar (β_1, β_2) Null sein, wenn τ , σ und ϱ gleichzeitig Null gesetzt werden, und dann ist ja auch $\delta = 0$. Immerhin kann man aber β_1 und β_2 noch so wählen, daß

$$\tau\beta_1^2 - \sigma\beta_1\beta_2 - \varrho\beta_2^2$$

und somit Δ Null wird. Dazu hat man nur den Quotienten $\frac{\beta_1}{\beta_2}$ entsprechend der Gleichung

$$\tau\left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right)^2 - \sigma\left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right) - \varrho = 0$$

zu bestimmen. Eine solche Gleichung läßt aber für $\frac{\beta_1}{\beta_2}$ keine Lösungen in Zahlengrößen aus einer Haupteinheit zu, sobald $\left(\frac{\sigma}{\tau}\right)^2 + \varrho$ negativ ist. Setzen wir demnach fest, daß σ , ϱ , τ gerade die Bedingung

$$-\left(\left(\frac{\sigma}{\tau}\right)^2 + \varrho\right) > 0$$

erfülle, womit bestimmt wird, daß weder ϱ noch τ verschwindet und die eine dieser Größen positiv ist, wenn die andere negativ ist, und endlich δ nicht verschwindet, so bleibt als einziges Werthepaar, für welches die Determinante Δ Null wird, $\beta_1 = \beta_2 = 0$ übrig.

Entsprechend den nach diesen Bedingungen noch möglichen Werthesystemen für die Größen π , π' , ϱ , σ , τ erhält man zu jedem einmal fixirten System eine bestimmte Definition von ab und $\frac{a}{b}$, so daß die Multiplicationsgesetze, ferner das Gesetz $\frac{a}{b} \cdot b = a$ gilt und endlich auch der Satz besteht: ein Product ist nur dann Null, wenn einer der Factoren verschwindet.

Es handelt sich nunmehr darum, durch besondere Wahl der noch willkürlichen Größen ein möglichst einfaches Multiplications- und Divisionsverfahren complexer Größen kennen zu lernen. Zu diesem Zwecke führen wir als eine Haupteinheit diejenige GröÙe g_0 ein, welche die Eigenschaft hat, daß für jeden Werth von b

$$g_0 b = b g_0 = b$$

ist. Es gibt eine solche GröÙe g_0 , denn ist b eine GröÙe derart, daß $\Delta \geq 0$ ist, so wird $\frac{b}{b}$ eine GröÙe g_0 , mit der multiplicirt jede andere GröÙe unverändert bleibt. Sie hat aber auch für jeden Werth von b denselben Werth, denn $\frac{b}{b}$ und $\frac{b'}{b'}$ sind gleich, weil diese GröÙen mit b multiplicirt b unverändert lassen.

Ist ferner

$$g = \xi_1 e_1 + \xi_2 e_2$$

irgend eine andere GröÙe, für die Δ auch nicht verschwindet, und sind ξ_1 und ξ_2 so gewählt, daß man aus den Gleichungen

und

$$g = \xi_1 e_1 + \xi_2 e_2$$

$$g \cdot g = g^2 = \eta_1 e_1 + \eta_2 e_2$$

e_1 und e_2 in bestimmter Weise entnehmen kann:

$$e_1 = \varepsilon_1^{(1)} g + \varepsilon_1^{(2)} g^2$$

$$e_2 = \varepsilon_2^{(1)} g + \varepsilon_2^{(2)} g^2$$

und bildet man

$$g^3 = \xi_1 e_1 + \xi_2 e_2$$

oder nach Substitution von e_1 und e_2 die Gleichung

$$g^3 + \varepsilon_1 g^2 + \varepsilon_2 g = 0,$$

die bei der Division durch g die Form erhält:

$$g^2 + \varepsilon_1 g + \varepsilon_2 g_0 = 0,$$

so ergibt sich für die aus den Einheiten e_1 und e_2 zusammengesetzten Größen, welche wir jetzt in der Form

$$\xi_0 g_0 + \xi_1 g$$

schreiben, das in der Gleichung

$$\begin{aligned} a \cdot b &= (\alpha_0 g_0 + \alpha_1 g) (\beta_0 g_0 + \beta_1 g) = \alpha_0 \beta_0 g_0 + (\alpha_0 \beta_1 + \alpha_1 \beta_0) g + \alpha_1 \beta_1 g^2 \\ &= (\alpha_0 \beta_0 - \alpha_1 \beta_1 \varepsilon_2) g_0 + (\alpha_0 \beta_1 + \alpha_1 \beta_0 - \alpha_1 \beta_1 \varepsilon_1) g \end{aligned}$$

ausgesprochene Multiplicationsverfahren.

Die GröÙe g_0 finden wir dadurch, daÙ wir in den allgemeinen Ausdrücken für γ_1 und γ_2

$$\alpha_1 = \beta_1, \quad \alpha_2 = \beta_2$$

setzen. Es wird

$$\gamma_1 = \frac{\pi'}{\delta}, \quad \gamma_2 = -\frac{\pi}{\delta}$$

und

$$g_0 = \gamma_1 e_1 + \gamma_2 e_2 = \frac{1}{\delta} (\pi' e_1 - \pi e_2).$$

Um auch g passend zu wählen, beachten wir, daÙ zwischen den Haupteinheiten e_1 und e_2 die folgende mit Hilfe der Ausdrücke für $e_1 e_1$, $e_1 e_2$, $e_2 e_2$ leicht zu verificirende Gleichung

$$\varrho^2 e_1 e_1 - \varrho \sigma e_1 e_2 - \varrho \tau e_2 e_2 = 0$$

besteht. Setzt man hier $\varrho e_1 = g e_2$, so folgt

$$e_2^2 (g^2 - \sigma g - \varrho \tau) = 0.$$

Suchen wir die in

$$g = \xi_1 e_1 + \xi_2 e_2$$

vorkommenden Größen ξ_1 , ξ_2 , indem wir den Quotienten $\frac{\varrho e_1}{e_2}$ bilden, also in den allgemeinen Ausdrücken für γ_1 und γ_2

$$\alpha_1 = \varrho, \quad \alpha_2 = 0, \quad \beta_1 = 0, \quad \beta_2 = 1$$

setzen, so wird

$$g = \frac{\pi' \sigma - \pi \varrho}{\delta} e_1 + \frac{\pi \tau}{\delta} e_2$$

und jetzt ist leicht ersichtlich zu machen, daß nicht $e_2 = 0$, sondern

$$g^2 - \sigma g - \varrho \tau g_0 = 0$$

ist.

An Stelle von g_0 und g setzen wir noch andere Haupteinheiten e und i , zwischen denen die einfachere Gleichung

$$i^2 + e^2 = 0$$

stattfindet.

Bildet man aus der Gleichung zwischen g und g_0 die folgenden:

$$g^2 - \sigma g g_0 - \varrho \tau g_0^2 = 0, \quad \left(g - \frac{\sigma}{2} g_0\right)^2 - g_0^2 \left(\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \varrho \tau\right) = 0,$$

bezeichnet die positive GröÙe $-\left(\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \varrho \tau\right)$ mit k^2 , so stehen die GröÙen

$$i = \frac{1}{k} \left(g - \frac{\sigma}{2} g_0\right) \quad \text{und} \quad e = g_0$$

in der verlangten Beziehung — und ebenso $e = g_0$ und

$$i = -\frac{1}{k} \left(g - \frac{\sigma}{2} g_0\right).$$

Weil $e = g_0$ eine GröÙe ist, mit der multiplicirt jede GröÙe ungeändert bleibt, setzen wir $e = 1$ und finden

$$i^0 = 1, \quad i^2 = -1, \quad i^3 = -i, \quad i^4 = 1, \quad i^{\mu+\nu} = i^\nu. \quad (\nu = 0, 1, 2, 3.)$$

Unter i selbst kann man die positive oder negative zweite Wurzel aus -1 verstehen. Kommen wir überein, $\sqrt{-1}$ mit i zu bezeichnen, so ist das früher genannte Multiplicationsverfahren für die aus den besonderen Einheiten 1 und $i = \sqrt{-1}$ zusammengesetzten GröÙen der Form

$$\xi_1 + \xi_2 i$$

in der Gleichung:

$$ab = (\alpha_1 + \alpha_2 i)(\beta_1 + \beta_2 i) = (\alpha_1 \beta_1 - \alpha_2 \beta_2) + (\alpha_2 \beta_1 + \alpha_1 \beta_2) i$$

und das Divisionsverfahren in der Gleichung

$$\frac{\alpha_1 + \alpha_2 i}{\beta_1 + \beta_2 i} = \frac{\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2}{\beta_1^2 + \beta_2^2} + \frac{\alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2}{\beta_1^2 + \beta_2^2} i$$

ausgesprochen.

Die GröÙen $a = \alpha_1 + \alpha_2 i$ nennt man im engeren Sinne *complexe ZahlengröÙen*, 1 und i sind ihre Haupteinheiten, -1 und $-i$ die entgegengesetzten (negativen) Hauptelemente. Die aus der Einheit 1 und deren Bruchtheilen gebildeten ZahlengröÙen α heißen *reell*, 1 die reelle Einheit, und die aus diesen entstehenden GröÙen αi *imaginär* und i die imaginäre Einheit. Darnach hat die complexe GröÙe $a = \alpha_1 + \alpha_2 i$ einen reellen und einen imaginären Theil.

Diese ZahlengröÙen werden wir in die Rechnung aufnehmen, denn sie erfüllen alle gestellten Forderungen. Man muß aber jetzt fragen, ob man nicht auch GröÙen, die aus mehr als zwei Hauptein-

heiten zusammengesetzt sind, unseren Forderungen entsprechend construiren kann. Diese Frage ist entschieden zu verneinen, wenn man die Theiler der Null aufser der Null selbst nicht zuläfst, indem die aus einer Haupteinheit gebildeten Gröfsen $\varepsilon_{\mu}^{(2)}$, nicht derart zu beschränken sind, daß die nicht identisch verschwindende Determinante Δ nur für das Werthesystem

$$\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 0 \quad (n > 2)$$

den Werth Null annimmt.

Von dem Nachweis dieser Behauptung müssen wir hier absehen, da uns die nöthigen Hilfsmittel fehlen, und ebensowenig können wir an dieser Stelle auf die Untersuchungen des Herrn Weierstraßs eingehen, die zu dem Resultate führen, daß selbst die Gesamtheit der aus n Haupteinheiten zusammengesetzten Gröfsen nicht mehr bietet als das oben definirte Gebiet von Gröfsen mit den Haupteinheiten e_1 und e_2 oder g_0 und g oder 1 und i , wenn man darin die Theiler der Null in naturgemäßer Verallgemeinerung des Falles, daß für $n = 1$ und $n = 2$ Null ein Theiler der Null ist, zuläfst, indem nämlich statt der ursprünglichen n Haupteinheiten (e_1, e_2, \dots, e_n) n andere (e'_1, e'_2, \dots, e'_n) eingeführt werden können derart, daß das Gebiet von Gröfsen

$$\xi_1 e'_1 + \xi_2 e'_2 + \dots + \xi_n e'_n$$

in Theilgebiete mit einer oder zwei Einheiten zerfällt, in denen das Multiplications- und Divisionsverfahren nach denjenigen Regeln gestaltet ist, welche für die Gröfsen α respective $\alpha_1 + \alpha_2 i$ aufgestellt wurden, wonach es dann „überflüssig“ erscheint, eine Arithmetik complexer Gröfsen mit mehr als zwei Haupteinheiten zu begründen.

Damit ist der Aufbau des Systems von Zahlengröfsen beendet, welche wir in der Rechnung benützen werden. Ob unsere Gröfsen aber ausreichen werden, d. h. ob jeder durch die Elementaroperationen definirte Zusammenhang zwischen gegebenen Gröfsen unserer Art und zu suchenden Gröfsen durch Gröfsen aus unserem Gebiete zu lösen sein wird, muß die fernere Untersuchung lehren. Wir können nicht wissen, ob gewisse Aufgaben nicht Gröfsen erfordern werden, die auf anderer Basis als auf Grund der Permanenz der arithmetischen Gesetze aufgebaut sind, denn es ist z. B. erlaubt, Gröfsen einzuführen, welche nicht allen Rechnungsgesetzen ganzer Zahlen gehorchen (wie die Quaternionen) und andererseits besteht noch die Möglichkeit, daß es neben der Addition, Multiplication, Subtraction und Division weitere Elementaroperationen gibt. Man kann nicht beweisen, daß es keine anderen mehr gibt, und darum sind die Untersuchungen über die Zahlengröfsen nur insoweit abgeschlossen, als sie auf die nun genugsam hervorgehobenen Anforderungen gegründet sind.

§ 9. Graphische Darstellung der Zahlengrößen.

Wenn wir zu dem Begriff der Zahl nur durch Betrachtung realer Objecte mit gemeinsamen Merkmalen gelangen konnten, liegt es nun nahe zu fragen, ob wir nicht von den rationalen und irrationalen und den complexen Zahlengrößen ein Abbild schaffen können, an dem uns das formale Denken zuversichtlich erleichtert wird, da unser Denken ohnehin in letzter Instanz an Dinge der Sinnenwelt anknüpft und auf Erfahrungen über Vorgänge an Dingen der Sinnenwelt gestützt ist.

Auf einer geraden Linie lassen sich die Punkte dadurch begrifflich fixiren, daß man nach Annahme einer Maßeinheit ihre Entfernungen von einem festen Punkte O der geraden Linie in dieser Maßeinheit angibt. Diesem Punkte O ordnen wir die Zahl Null zu und fassen ihn als „Träger“ der Null auf. Tragen wir von O aus die bestimmte Strecke, welche als Maßeinheit fixirt ist, ein, zwei, n mal auf den beiden Theilen der geraden Linie auf, so sollen die Endpunkte dieser Vielfachen der Maßeinheit Träger der Zahlen $+1, +2, \dots +n \dots$ resp. $-1, -2, \dots -n \dots$ sein, je nachdem wir uns in dem vorher fixirt gedachten positiven oder negativen Theile der Linie befinden. Die gleich großen Strecken zwischen zwei aufeinander folgenden Punkten, die die Träger von $+a$ oder $-a$ und $\pm(a+1)$ sind, theile man in n gleiche Theile und fasse den m ten Theilungspunkt, den man bei dem Fortschreiten von dem O näher liegenden Punkte erreicht, als Träger von

$$\pm\left(a + \frac{m}{n}\right)$$

auf. — So wird die Entfernung durch eine rationale Zahlengröße fixirt, wenn sie in rationalem Verhältnis zur Maßeinheit steht; wenn aber dieses Verhältnis irrational ist, wird man eine unendliche Anzahl rationaler Elemente $a_1, a_2, \dots a_n \dots$ so angeben können, daß die den Summen

$$a_1, a_1 + a_2, \dots a_1 + a_2 + \dots + a_n, \dots \quad (\alpha)$$

zugehörigen Punkte dem durch eine Zahlengröße zu fixirenden Punkte mit wachsendem n beliebig nahe kommen, und man sagt: Die Entfernung des Punktes ist a , wenn a die der unendlichen Reihe $(a_1 + a_2 + \dots)$ oder wenn a die der Fundamentalreihe (α) zugehörige Zahlengröße ist.

Nach diesen Festsetzungen leuchtet ein, daß zwei Entfernungen gleich oder verschieden sind, wenn die dieselben fixirenden Zahlengrößen gleich oder verschieden sind.

So dienen die reellen Zahlengrößen zur Bestimmung der Lage eines Punktes, und da umgekehrt jeder Zahlengröße ein bestimmter Punkt der geraden Linie zuzuordnen ist (ein Satz, den Cantor mit

vollem Recht als Axiom bezeichnet), so haben die reellen Zahlengrößen in der That ein Abbild auf der geraden Linie.

Es fällt nun auch nicht schwer, ein Abbild der complexen Zahlengrößen zu schaffen.

Legen wir durch einen festen Punkt O zwei einander senkrecht schneidende gerade Linien, die eine etwa horizontal, dann liegt jeder Punkt der durch die beiden Linien bestimmten Ebene auf einer oder keiner der Geraden oder Axen, nur O liegt auf beiden.

Die Punkte der Axen fixiren wir in der früheren Weise durch die Entfernungen von O und zwar mit dem positiven oder negativen Zeichen, je nachdem der Punkt der horizontalen Axe rechts oder links von O , und der der verticalen Axe ober- oder unterhalb der horizontalen Axe liegt.

Ein Punkt A der genannten Ebene, der außerhalb der Axen liegt, ist fixirt, wenn man seine senkrechten Abstände von den Axen oder die gleichgroßen Entfernungen der Fußpunkte P_1 und P_2 der von dem Punkte A auf die Axen gefällten Lothe von O kennt, oder wenn man die Länge des von A auf die horizontale Axe gefällten Lothes und die Entfernung des zugehörigen Fußpunktes P_1 von O angeben kann. Diese Entfernung heist die Abscisse und jenes Loth die Ordinate des Punktes A . Die Abscisse ist positiv, wenn A rechts von der verticalen Axe liegt, und negativ im entgegengesetzten Falle. Die Ordinate wird positiv oder negativ genannt, je nachdem A ober- oder unterhalb der horizontalen Axe gelegen ist.

Jeder Punkt der Ebene ist nach diesen Festsetzungen durch seine Coordinaten, die Abscisse und Ordinate bestimmt; zu einem Paar von Zahlengrößen, von denen die erste die Abscisse, die zweite die Ordinate ausdrücken soll, gehört aber auch ein bestimmter Punkt. Wenn wir darum in der complexen Zahlengröße $a_1 + a_2 i$ die reelle Zahlengröße a_1 als Abscisse und die zweite reelle Zahlengröße a_2 als Ordinate eines Punktes ansehen, so gehört zu jeder Zahlengröße $a_1 + a_2 i$ ein bestimmter Punkt und umgekehrt zu jedem Punkt auch eine Zahlengröße.

Die reellen Zahlengrößen finden ihre Träger auf der horizontalen, die rein imaginären auf der verticalen Axe, insbesondere sind die den vier Zahlengrößen $1, -1, i, -i$ zugehörigen Punkte die in der Entfernung Eins auf dem positiven resp. negativen Theile der „Axe der reellen oder rein imaginären Zahlengrößen“ befindlichen Punkte.

Die Entfernung des der Zahlengröße $a_1 + a_2 i = a$ zugehörigen Punktes A von dem Anfangspunkte der Coordinaten d. i. dem Punkte O ist nach dem Pythagoreischen Lehrsatz durch den positiven Werth der zweiten Wurzel aus der Summe der zweiten Potenzen a_1^2 und a_2^2 gemessen. Man nennt diese Größe

$$\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}$$

den *absoluten Betrag* von a und bezeichnet diesen wie früher mit

$$|a| \text{ oder } |\alpha_1 + \alpha_2 i|.$$

Diese Definition des absoluten Betrages stimmt mit der früheren überein, wenn $\alpha_2 = 0$ und a eine reelle GröÙe wird.

Die Betrachtung der gegenseitigen Lage der den GröÙen

$$0, a, b, a + b$$

zugehörigen Punkte

$$O, A, B, C$$

lehrt, daÙ die Entfernungen

$$OA, OB, AC, OC$$

durch die GröÙen

$$|a|, |b|, |b|, |a + b|$$

gemessen werden, und weil eine Seite eines Dreiecks nicht größer sein kann als die Summe und nicht kleiner ist als die Differenz der beiden andern, so folgen die Ungleichungen

$$||a| - |b|| \leq |a + b| \leq |a| + |b|.$$

Da ferner der absolute Betrag der Differenz zweier GröÙen a und b durch die Entfernung der Träger derselben repräsentiert ist — wornach die der Bedingung $|x - a| = r$ genügenden ZahlengröÙen x in den Punkten eines Kreises um a mit dem Radius r ihre Träger besitzen — ist die Entfernung der Punkte A und B durch $|a - b|$ gemessen und auf Grund des oben genannten Satzes entstehen die Ungleichungen:

$$|a| + |b| \geq |a - b| \geq ||a| - |b||.$$

Wir beweisen die in den aufgestellten Ungleichungen ausgesprochenen Sätze in zweiter Linie durch Vergleich der absoluten Beträge von $|a + b|$ und $|a - b|$ mit den GröÙen $|a| + |b|$ und $||a| - |b||$, weil wir die bei dem Beweise verwendeten geometrischen Beziehungen gewiß durch arithmetische Relationen ersetzen können und auch ersetzen müssen, wenn wir den Beweis als arithmetisch bindend erkennen wollen.

Es sei

$$a = \alpha_1 + \alpha_2 i, \quad b = \beta_1 + \beta_2 i,$$

dann ist

$$a + b = \alpha_1 + \beta_1 + i(\alpha_2 + \beta_2),$$

$$|a + b| \cdot |a + b| = |a + b|^2 = (\alpha_1 + \beta_1)^2 + (\alpha_2 + \beta_2)^2$$

$$= \alpha_1^2 + \beta_1^2 + \alpha_2^2 + \beta_2^2 + 2(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)$$

und

$$[|a| + |b|]^2 = \alpha_1^2 + \beta_1^2 + \alpha_2^2 + \beta_2^2 + 2\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \cdot \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2}.$$

Da aber

$$(\alpha_1\beta_2 - \alpha_2\beta_1)^2 \geq 0$$

und somit

$$2 \alpha_1 \beta_1 \alpha_2 \beta_2 \leq \alpha_1^2 \beta_2^2 + \alpha_2^2 \beta_1^2$$

ist, wird

$$4 (\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2)^2 \leq 4 (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) (\beta_1^2 + \beta_2^2),$$

$$2 (\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2) \leq 2 \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \cdot \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2}$$

und endlich

$$|a + b|^2 \leq [|a| + |b|]^2$$

oder

$$|a + b| \leq |a| + |b|,$$

d. h. *der absolute Betrag einer Summe ist nicht gröfser als die Summe der absoluten Beträge der Summanden.*)*

Mit Hilfe derselben Schlüsse folgt ferner, dafs der absolute Betrag einer Summe nicht kleiner ist als der absolute Betrag der Differenz der absoluten Beträge der Summanden, dafs ferner der absolute Betrag einer Differenz nicht kleiner ist als der absolute Betrag der Differenz des absoluten Betrages von Minuend und Subtrahend, aber auch nicht gröfser als die Summe der absoluten Beträge von Minuend und Subtrahend.

Der absolute Betrag eines Productes ist gleich dem Producte der absoluten Beträge der Factoren.

Indem

$$ab = (\alpha_1 \beta_1 - \alpha_2 \beta_2) + (\alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1) i$$

ist, wird

$$|ab| = \sqrt{(\alpha_1 \beta_1 - \alpha_2 \beta_2)^2 + (\alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1)^2} = \sqrt{(\alpha_1^2 + \alpha_2^2) (\beta_1^2 + \beta_2^2)}$$

und diese Gröfse ist wirklich $|a| \cdot |b|$.

Der absolute Betrag eines Quotienten ist gleich dem Quotienten der absoluten Beträge des Dividends und Divisors.

Da der Quotient

$$\frac{a}{b} = \frac{\alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1}{\beta_1^2 + \beta_2^2} + \frac{\alpha_1 \beta_1 - \alpha_2 \beta_2}{\beta_1^2 + \beta_2^2} i$$

ist, wird

$$\left| \frac{a}{b} \right| = \sqrt{\frac{(\alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1)^2 + (\alpha_1 \beta_1 - \alpha_2 \beta_2)^2}{(\beta_1^2 + \beta_2^2)^2}} = \sqrt{\frac{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}{\beta_1^2 + \beta_2^2}}$$

und jetzt ist der Satz bewiesen; denn die Wurzel aus einem Quotienten ist gleich dem Quotienten der Wurzel aus Dividend und Divisor.

*) Der bei diesem Beweise benützte Satz: Die zweite Wurzel aus einem Producte ist gleich dem Product der Wurzeln aus den Factoren, folgt aus der Definition der Wurzel $\sqrt{m \cdot n}$ als derjenigen Gröfse, welche mit sich selbst multiplicirt mn gibt und der Definition des Productes zweier Gröfsen \sqrt{m} und \sqrt{n} .

§ 10. Summen unendlich vieler complexer Größen.

Die Summen unendlich vieler rationaler Zahlengrößen sind bereits untersucht, es bleibt uns noch übrig, die Summen unendlich vieler complexer Zahlengrößen

$$a_\nu = \alpha'_\nu + \alpha''_\nu i \quad (\nu = 1, 2, 3 \dots)$$

zu betrachten.

Wir wissen bereits, was man unter einer solchen Summe zu verstehen und wann sie eine Bedeutung für uns hat, denn die früheren Definitionen sagen ja aus, daß die Summe diejenige Größe ist, deren reeller und imaginärer Theil

$(\alpha'_1 + \alpha'_2 + \alpha'_3 + \dots)$ resp. $(\alpha''_1 + \alpha''_2 + \alpha''_3 + \dots)i$ ist und es müssen die Summen

$$\sum \alpha'_\nu \quad \text{und} \quad \sum \alpha''_\nu$$

für sich endlich sein, damit $\sum a_\nu$ endlich ist. — Gibt es unter den

Größen α' positive und negative (β' und γ'), ebenso unter den Größen α'' entgegengesetzt bezeichnete β'' und γ'' , so müssen die Summen

$$\sum \beta'_\nu, \quad \sum \beta''_\nu, \quad -\sum \gamma'_\nu, \quad -\sum \gamma''_\nu$$

lauter endliche positive Größen sein.

Hier handelt es sich darum, neue Kriterien für das Endlichsein einer Summe unendlich vieler complexer Größen aufzustellen. Wir setzen voraus, daß die Summen

$$\begin{aligned} \sum |\alpha'_\nu| &= \sum \beta'_\nu + \sum (-\gamma'_\nu) \\ \sum |\alpha''_\nu| &= \sum \beta''_\nu + \sum (-\gamma''_\nu) \end{aligned}$$

endlich sind, dann ist

$$|\alpha'_\nu| + |\alpha''_\nu| \geq \sqrt{\alpha'^2_\nu + \alpha''^2_\nu} = |\alpha_\nu|$$

und man sieht, daß die Summe der absoluten Beträge einer unendlichen Reihe

$$a_1 + a_2 + a_3 + \dots$$

nothwendig endlich sein muß, wenn die Reihe eine endliche Summe haben soll.

Hat umgekehrt die Reihe $\sum |a_\nu|$ eine endliche Summe, so sind wegen der Ungleichungen

$$\begin{aligned} |a_\nu| &= \sqrt{\alpha'^2_\nu + \alpha''^2_\nu} \geq |\alpha'_\nu| \\ |a_\nu| &= \sqrt{\alpha'^2_\nu + \alpha''^2_\nu} \geq |\alpha''_\nu| \end{aligned}$$

die Summen der Reihen $\sum |\alpha'_v|$, $\sum |\alpha''_v|$ und $\sum \alpha_v$ endlich. Wir haben also den Satz:

Die nothwendige und hinreichende Bedingung dafür, daß die Summe unendlich vieler complexer Größen endlich ist, besteht in dem Endlichsein der Summe der absoluten Beträge dieser Größen. Ferner erkennt man als eine nothwendige und hinreichende Bedingung für das Endlichsein der Summe der unendlichen Reihe die folgende:

Es muß der absolute Betrag der Summe von beliebig aber nicht unendlich vielen willkürlich gewählten Gliedern der Reihe kleiner bleiben als eine endliche positive GröÙe g.

Angenommen die Summe der unendlich vielen Größen a_v sei endlich, dann ist auch die Summe der Reihe $\sum_v |a_v|$ endlich und darum existirt eine positive endliche GröÙe g , die größer ist als die Summe irgend einer endlichen Anzahl von Gliedern $|a_v|$. Ist aber für irgend einen Werth von n

$$g > \sum_{v=1}^n |a_v|,$$

so wird umsomehr

$$g > \left| \sum_{v=1}^n a_v \right|$$

und die genannte Bedingung ergibt sich als nothwendig. Sie ist aber auch hinreichend, denn aus der Voraussetzung

$$g > \left| \sum_{v=1}^n a_v \right|$$

folgt jetzt

$$g \geq \sum_{v=1}^n \beta'_v, \quad g \geq \sum_{v=1}^n (-\gamma'_v), \quad g \geq \sum_{v=1}^n \beta''_v, \quad g \geq \sum_{v=1}^n (-\gamma''_v).$$

In der That nehmen wir diejenigen Größen a_v aus der Summe $\sum a_v$ heraus, in welchen z. B. der reelle Theil positiv ist, und nennen wir sie $\beta'_v + \alpha''_v i$, so wird

$$g > \left| \sum_{v=1}^n \beta'_v + i \sum_{v=1}^n \alpha''_v \right| \geq \sum_{v=1}^n \beta'_v$$

usw.

Ein weiteres Theorem ist das nachstehende:

Haben die unendlich vielen Zahlengrößen

$$a_v = \alpha'_v + \alpha''_v i \quad (v = 1, 2, \dots)$$

eine unendliche Summe S, so kann man nach Wahl einer beliebig kleinen positiven GröÙe δ stets ein n finden derart, daß der absolute Betrag von

$$a_{m+1} + a_{m+2} + \cdots + a_{m+\mu} = \sum_{v=m+1}^{m+\mu} a_v$$

für jedes μ kleiner wird als δ , sobald nur $m \geq n$ ist.

Da diese Behauptung für die Reihe der absoluten Beträge

$$|a_1| + |a_2| + \cdots + |a_v| + \cdots$$

zutrifft und die Summe von absoluten Beträgen $|a_v|$ nicht kleiner ist als der absolute Betrag der Summe der Größen a_v , so ist das Theorem richtig.

Die Summen $S_n = \sum_{v=1}^n a_v$ convergiren nach der endlichen GröÙe S , denn es ist

$$|S - S_n| < \delta \quad (n \geq m)$$

und darum sagt man: die unendliche Reihe $\sum a_v$ convergirt.

Wie die Rechnungsoperationen mit Reihen complexer GröÙen ausgeführt werden, bedarf keiner Erläuterung mehr.

Die in Rede stehenden Reihen, in welchen die Reihen der positiven und negativen Glieder $\sum a'_v$ und $\sum a''_v$ für sich endliche Summen haben, nennt man *unbedingt convergent*, womit angezeigt sein soll, daß die Convergenz nach S unabhängig von der Anordnung der Terme a_v eintritt. Nun sprechen wir den ersten der obigen Sätze folgendermaßen aus:

Convergirt eine Reihe unendlich vieler complexer GröÙen unbedingt, so convergirt auch die Reihe der absoluten Beträge der GröÙen, und umgekehrt muß eine Reihe unbedingt convergent sein, wenn die Reihe der absoluten Beträge — oder wie man sagt — wenn die Reihe *absolut* convergirt.

Reihen, deren Summe S von der Anordnung ihrer Glieder abhängig ist, heißen *bedingt convergent*, und Reihen, deren Summe bei jeder Anordnung der Terme unendlich sind, *divergent*. Die bedingt convergenten Reihen nehmen wir nicht in die Rechnung auf, da ihnen der Charakter von Summen abgeht.

§ 11. Producte unendlich vieler Factoren.*)

In diesem Capitel haben wir noch das Product unendlich vieler ZahlengröÙen c_v zu definiren. Den früheren Betrachtungen gemäß muß die Definition derart gewählt werden, daß das *unendliche Product* den Fall eines endlichen Productes $c_1 c_2 \dots c_n$ umfaßt und für

*) Siehe Weierstraß in Crelle's Journal Bd. 51, Pincherle l. c. und Mittag-Leffler in Acta mathematica Bd. 4.

dasselbe die Multiplicationsgesetze gelten. Ferner darf es nicht unendlich sein, wenn die durch Multiplication bestimmter Größen $c_1, c_2, c_3 \dots$ begrifflich festgestellte GröÙe für uns eine Bedeutung haben soll.

Bringt man die Größen c_v auf die Form $1 + a_v$, bildet dann

$$P_1 = 1 + a_1$$

$$P_2 = (1 + a_1)(1 + a_2) = 1 + a_1 + a_2 + a_1 a_2$$

$$P_3 = (1 + a_1)(1 + a_2)(1 + a_3) \\ = 1 + a_1 + a_2 + a_1 a_2 + a_3 + a_1 a_3 + a_2 a_3 + a_1 a_2 a_3$$

$$\dots \dots \dots$$

$$P_n = (1 + a_1)(1 + a_2) \dots (1 + a_n) \\ = 1 + a_1 + a_2 + a_1 a_2 + a_3 + \dots + a_n + a_1 a_n + a_2 a_n + \dots \\ + a_1 a_2 \dots a_n,$$

so läßt sich P_n als Summe der folgenden $(n + 1)$ Größen g_v darstellen:

$$g_0 = 1$$

$$g_1 = a_1$$

$$g_2 = a_2 + a_1 a_2 = (1 + a_1) a_2$$

$$g_3 = a_3 + a_1 a_3 + a_2 a_3 + a_1 a_2 a_3 = (1 + a_1)(1 + a_2) a_3$$

$$g_4 = a_4 + a_1 a_4 + a_2 a_4 + a_1 a_2 a_4 + a_3 a_4 + a_1 a_3 a_4 + a_2 a_3 a_4 + a_1 a_2 a_3 a_4 \\ = (1 + a_1)(1 + a_2)(1 + a_3) a_4$$

$$\dots \dots \dots$$

$$g_n = a_n + a_1 a_n + a_2 a_n + a_1 a_2 a_n + a_3 a_n + \dots + a_1 a_2 \dots a_{n-1} a_n \\ = (1 + a_1)(1 + a_2) \dots (1 + a_{n-1}) a_n.$$

Das Product der unendlich vielen Factoren $c_v = 1 + a_v$ wird jetzt als Summe der unendlich vielen Summanden g_v definirt, deren Bildungsgesetz die obigen Gleichungen klar erkennen lassen.

Diese Definition ist erlaubt, weil das Product einer endlichen Anzahl von Größen mit eingeschlossen ist.

Wir fragen, wann das unendliche Product

$$(1 + a_1)(1 + a_2) \dots (1 + a_v) \dots,$$

welches mit

$$\prod_{v=1}^{\infty} (1 + a_v)$$

bezeichnet wird, endlich ist.

Offenbar dann, wenn ein Factor $(1 + a_v)$ Null ist. Wir denken aber diese Factoren abgesondert und untersuchen das Product unendlich vieler nicht verschwindender Factoren.

Soll ein solches Product unabhängig von der Anordnung der

Factoren endlich sein und das ist ja oben verlangt worden, so muß die unendliche Reihe

$$g_0 + g_1 + g_2 + \cdots + g_r + \cdots$$

unbedingt convergiren; dann aber convergirt diese Reihe nothwendig absolut.

Bezeichnet man den absoluten Betrag von a_r hier mit α_r und setzt

$$\gamma_r = \alpha_r + \alpha_1 \alpha_r + \alpha_2 \alpha_r + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_r + \alpha_3 \alpha_r + \cdots + \alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_r,$$

so wird $\gamma_r \geq |g_r|$, und setzt man voraus, daß die Reihe positiver Größen

$$1 + \gamma_1 + \gamma_2 + \cdots + \gamma_r + \cdots$$

convergirt, so convergirt die Reihe der g_r absolut. Damit aber von einer endlichen Summe der Reihe $1 + \gamma_1 + \gamma_2 + \cdots$ die Rede sein kann, muß nothwendig die Reihe der absoluten Beträge der Größen α_r endlich sein, enthält ja doch γ_r die Größe $|\alpha_r| = \alpha_r$, und diese Bedingung ist offenbar auch für die unbedingte Convergenz der Reihe der g nothwendig.

Wir nehmen also an, daß die Reihe

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_r + \cdots \quad (\text{A})$$

eine endliche Summe S besitze, und setzen fest, daß S kleiner sei als Eins. Andernfalls kann man durch Absonderung einer bloß endlichen Anzahl von Gliedern α_μ eine Reihe bilden, in welcher diese Forderung erfüllt ist, und in dem von der Anordnung der Factoren unabhängigen unendlichen Producte kann man die den Gliedern α_μ entsprechenden Factoren $(1 + \alpha_\mu)$ abtrennen, deren Product für sich endlich ist. Es bleibt dann ein unendliches Product zur Untersuchung übrig, dessen zugeordnete Reihe (A) eine endliche Summe $S < 1$ besitzt. Die positiven Größen α_r sind jetzt kleiner als Eins, folglich wird

$$1 + \alpha_r < \frac{1}{1 - \alpha_r}$$

und

$$(1 + \alpha_1)(1 + \alpha_2) \cdots (1 + \alpha_n) < \frac{1}{(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) \cdots (1 - \alpha_n)}.$$

Doch weil auch

$$(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) \cdots (1 - \alpha_n) > 1 - (\alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_n),$$

wird das Product

$$(1 + \alpha_1)(1 + \alpha_2) \cdots (1 + \alpha_n) < \frac{1}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_n)}$$

und umsomehr

$$(1 + \alpha_1)(1 + \alpha_2) \cdots (1 + \alpha_n) < \frac{1}{1 - S}.$$

Nun ist das unendliche Product $\prod_{r=1}^{\infty} (1 + \alpha_r)$ endlich, wenn die unendliche Reihe

$$1 + \sum_{v=1}^{\infty} (\alpha_v + \alpha_1 \alpha_v + \alpha_2 \alpha_v + \cdots + \alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_v)$$

convergiert; da aber die Summe der ersten $n + 1$ Glieder

$$1 + \gamma_1 + \gamma_2 + \cdots + \gamma_n = (1 + \alpha_1)(1 + \alpha_2) \cdots (1 + \alpha_n)$$

kleiner ist als die endliche Zahlengröße $\frac{1}{1-\delta}$, was auch n sei, so ist

das unendliche Product $\prod_{v=1}^{\infty} (1 + \alpha_v)$, welches durch die Summe der

unendlichen Reihen $1 + \sum_{v=1}^{\infty} \gamma_v$ definirt ist, und umsomehr der absolute Betrag von

$$\sum_{v=0}^{\infty} g_v \quad \text{oder} \quad \prod_{v=1}^{\infty} (1 + \alpha_v)$$

endlich.

Wir erhalten somit den Satz: *Die nothwendige und hinreichende Bedingung dafür, daß ~~die~~ ein von der Anordnung der Factoren unabhängiges Product $\prod_{v=1}^{\infty} (1 + \alpha_v)$ endlich ist, besteht in der Convergenz der unendlichen Reihe*

$$|\alpha_1| + |\alpha_2| + \cdots + |\alpha_v| + \cdots$$

Man sagt, die Producte P_1, P_2, \dots, P_n convergiren nach einem bestimmten Werthe P , wenn nach Wahl einer beliebig kleinen positiven Größe δ stets ein n so bestimmt werden kann, daß für jedes $v \geq n$

$$|P - P_v| < \delta.$$

Darnach behaupten wir, daß in dem von der Anordnung der Factoren unabhängigen Producte $\prod_{v=1}^{\infty} (1 + \alpha_v)$, welches mit P bezeichnet sei, die Producte

$$P_n = (1 + \alpha_1)(1 + \alpha_2) \cdots (1 + \alpha_n)$$

mit wachsendem n nach dem unendlichen Producte P convergiren.

Bildet man den absoluten Betrag des Quotienten $\frac{P}{P_n}$, d. i.

$$|(1 + \alpha_{n+1})(1 + \alpha_{n+2}) \cdots|$$

und bezeichnet

$$\prod_{v=n+1}^{\infty} (1 + \alpha_v) = (1 + \alpha_{n+1})(1 + \alpha_{n+2}) \cdots$$

mit $1 + \varepsilon_n$, wo

$$|\varepsilon_n| < \alpha_{n+1} + \alpha_{n+2} + \cdots + \alpha_{n+1} \alpha_{n+2} + \cdots,$$

so wird

$$\left| \frac{P}{P_n} \right| \leq 1 + |\varepsilon_n| < (1 + \alpha_{n+1})(1 + \alpha_{n+2}) \cdots$$

Nennt man die Summe der Größen

$$\alpha_{n+1}, \alpha_{n+2}, \dots, \alpha_{n+r}, \dots$$

S_n , so wird für hinlänglich große n S_n kleiner als 1 und kleiner als eine beliebig kleine vorgelegte GröÙe. Dann ist

$$1 + |\varepsilon_n| \leq \frac{1}{1 - S_n}$$

und

$$\left| \frac{P}{P_n} \right| \leq \frac{1}{1 - S_n}.$$

Bringt man endlich $\frac{1}{1 - S_n}$ auf die Form $1 + \varepsilon$, wo ε beliebig klein ist, und setzt

$$\varepsilon |P_n| = \delta,$$

so wird

$$\left| \frac{P}{P_n} \right| - 1 \leq \left| \frac{P}{P_n} - 1 \right| < \frac{\delta}{|P_n|}$$

oder

$$|P - P_n| < \delta,$$

und der Beweis ist erbracht.

Man sagt wieder, das unendliche Product $\prod_{v=1}^{\infty} (1 + a_v)$ convergirt, wenn nach Annahme einer beliebig kleinen positiven GröÙe δ stets eine solche ganze Zahl n angebbar ist, daß der absolute Betrag

$$\left| \prod_{v=m}^{\infty} (1 + a_v) - 1 \right|$$

oder daß für jeden Werth von μ der Betrag

$$\left| \prod_{v=m}^{m+\mu} (1 + a_v) - 1 \right|$$

kleiner ist als δ , sobald nur $m \geq n$ ist. Die endliche GröÙe, nach welcher die Producte P_n convergiren, ist der Werth der unendlichen Productes.

Ein unendliches Product heiÙt *absolut convergent*, wenn auch noch $\prod_{v=1}^{\infty} (1 + a_v)$ convergirt. In diesem Falle ist wegen der Ungleichung $(1 + \alpha_{m+1})(1 + \alpha_{m+2}) \dots (1 + \alpha_{m+\mu}) - 1 > \alpha_{m+1} + \alpha_{m+2} + \dots + \alpha_{m+\mu}$ die unendliche Reihe

$$a_1 + a_2 + \dots + a_v + \dots$$

absolut convergent.

Sind die GröÙen $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ alle kleiner als Eins und hat ihre Summe einen endlichen Werth, so ist nicht allein $\prod (1 + \alpha_v)$, son-

dern auch das beständig abnehmende Product $\prod (1 - \alpha_v)$ convergent ohne Null zu werden, denn es ist

$$\frac{P_{m+\mu}}{P_m} = \prod_{v=m+1}^{m+\mu} (1 - \alpha_v) > 1 - (\alpha_{m+1} + \alpha_{m+2} + \dots + \alpha_{m+\mu})$$

und wenn m so groß gewählt ist, daß die Summe in den Klammern kleiner ist als δ , wird

$$P_{m+\mu} > P_m (1 - \delta).$$

Zeigt man umgekehrt in einem besonderen Falle zunächst die Convergenz der Producte P_n nach einer von Null verschiedenen Größe, so folgt, daß die Reihe der $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ eine endliche Summe besitzt. Die Convergenz von $\prod (1 - \alpha_v)$ zieht nämlich diejenige von $\prod (1 + \alpha_v)$ nach sich, indem

$$\begin{aligned} 1 - \delta &< (1 - \alpha_{m+1}) (1 - \alpha_{m+2}) \dots (1 - \alpha_{m+\mu}) \\ &\leq (1 - \alpha_{m+1}^2) (1 - \alpha_{m+2}^2) \dots (1 - \alpha_{m+\mu}^2) \leq 1 \end{aligned}$$

und somit

$$1 \leq (1 + \alpha_{m+1}) (1 + \alpha_{m+2}) \dots (1 + \alpha_{m+\mu}) \leq \frac{1}{1 - \delta}$$

wird, wo die rechte Seite bei hinlänglich großen m und beliebig kleinen δ von 1 um beliebig wenig abweicht. Z. B. das Product

$$\prod_{v=2}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{v^2}\right)$$

ist convergent, denn die Producte

$$\begin{aligned} \prod_{v=2}^n \left(1 - \frac{1}{v^2}\right) &= \frac{1 \cdot 2}{2 \cdot 2} \cdot \frac{2 \cdot 4}{3 \cdot 3} \dots \frac{(n-1)(n+1)}{n \cdot n} = \frac{1 \cdot 2 \dots (n-1)}{1 \cdot 2 \dots n} \cdot \frac{3 \cdot 4 \dots (n+1)}{2 \cdot 3 \dots n} \\ &= \frac{n+1}{2n} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2n} \end{aligned}$$

convergiren mit wachsendem n nach $\frac{1}{2}$, und darum ist auch die Summe der unendlichen Reihe

$$\frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \dots + \frac{1}{n^2} + \dots$$

und umsomehr

$$\frac{1}{2^m} + \frac{1}{3^m} + \dots + \frac{1}{n^m} + \dots \quad (m > 2)$$

endlich.

Bei der Auswerthung eines absolut convergenten Productes kann man die Factoren beliebig in Gruppen zusammenfassen, und andererseits läßt sich das Product $\prod (1 + \alpha_v)$ in ein convergentes unendliches Product verwandeln, dessen Factoren selbst unendliche Producte sind.

Es sei etwa

$$1 + b_1 = (1 + a_1)(1 + a_1') \dots$$

$$1 + b_2 = (1 + a_2)(1 + a_2') \dots$$

$$\dots \dots \dots$$

wo die Größen $a_1, a_1', \dots, a_2, a_2', \dots$ Größen a_v sind, dann wird

$$b_1 = a_1 + a_1' + a_1 a_1' + \dots$$

$$b_2 = a_2 + a_2' + a_2 a_2' + \dots$$

$$\dots \dots \dots$$

und man sieht, daß das Product $\prod_{v=1}^{\infty} (1 + b_v)$ definirende Summe keine anderen Glieder enthält als die Summe, durch welche das Product $\prod (1 + a_v)$ bestimmt ist. Doch diese endlichen Summen sind von der Anordnung der Summanden unabhängig und einander gleich.

Mit Producten der hier betrachteten Art rechnet man wie mit den früheren Zahlengrößen.

Um z. B. das Product

$$\prod (1 + a_v) = P \quad \text{und} \quad \prod (1 + b_v) = Q$$

zu bilden, hat man das Product

$$\prod (1 + a_v)(1 + b_v) = \prod (1 + a_v + b_v + a_v b_v)$$

zusammensetzen. Es ist endlich und hat den Werth PQ , denn erstens ist

$$\sum |a_v + b_v + a_v b_v| \leq \sum \{|a_v| + |b_v| + |a_v b_v|\}$$

mit $\sum |a_v|$ und $\sum |b_v|$ endlich und zweitens gibt der Vergleich der das neue Product definirenden Summe mit dem Producte der Reihen

$$\sum g_v = 1 + a_1 + \sum_{v=2}^{\infty} (1 + a_1)(1 + a_2) \dots (1 + a_{v-1}) a_v$$

$$\sum h_v = 1 + b_1 + \sum_{v=2}^{\infty} (1 + b_1)(1 + b_2) \dots (1 + b_{v-1}) b_v,$$

daß die zweite Behauptung richtig ist.

Enthält das endliche Product $\prod (1 + a_v) = P$ keinen verschwindenden Factor, so ist das Product $\prod \left(\frac{1}{1 + a_v} \right)$ ebenfalls endlich und besitzt den Werth $\frac{1}{P}$.

Setzt man

$$\prod \left(\frac{1}{1 + a_v} \right) = \prod \left(1 - \frac{a_v}{1 + a_v} \right)$$

und zeigt, daß

$$\sum \left| \frac{a_v}{1+a_v} \right|$$

zugleich mit $\sum |a_v|$ endlich ist, so hat das neue Product gewiß einen endlichen Werth, und zwar folgt aus

$$\prod (1+a_v) \cdot \prod \left(\frac{1}{1+a_v} \right) = \prod (1+a_v) \frac{1}{1+a_v} = 1$$

$$\prod \left(\frac{1}{1+a_v} \right) = \frac{1}{P}.$$

Die genannte Summe ist wirklich endlich, denn bezeichnet α einen positiven Werth, der kleiner ist als jeder der von Null verschiedenen Werthe $|1+a_v|$, so gilt die Ungleichung

$$\sum \left| \frac{a_v}{1+a_v} \right| < \frac{1}{\alpha} \sum |a_v|,$$

in der die rechte Seite kleiner ist als eine noch angebbare Gröfse g .

Man kann an diesen Satz die Bemerkung knüpfen: *Ein absolut convergentes Product $\prod (1+a_v)$ kann nicht verschwinden, wenn nicht einer der Factoren $(1+a_v)$ Null ist.* —

Der Quotient zweier endlichen Producte

$$\prod (1+a_v), \quad \prod (1+b_v)$$

mit den Werthen P und Q , deren zweites keinen verschwindenden Factor hat, ist

$$\prod \left(\frac{1+a_v}{1+b_v} \right)$$

und hat den Werth $\frac{P}{Q}$, denn es ist

$$\prod \left(\frac{1+a_v}{1+b_v} \right) = \prod (1+a_v) \cdot \prod \left(\frac{1}{1+b_v} \right) = \frac{P}{Q}.$$

Wenn die einem Producte $\prod (1+a_v)$ zugeordnete Reihe

$$a_1 + a_2 + \dots + a_v + \dots$$

nur bedingt convergirt, kann man die früheren Schlüsse über die Convergenz des Productes nicht mehr ziehen. Das Product kann wohl mit der Reihe zugleich endlich sein, aber nicht bei jeder Factorenfolge, es ist nur bedingt convergent.

Z. B. ist das Product

$$\prod_{v=2}^{\infty} \left(1 + (-1)^v \frac{1}{v} \right)$$

bedingt convergent, denn die Reihe

$$\frac{1}{2} - \frac{1}{8} + \frac{1}{4} - \dots - \frac{1}{2v-1} + \frac{1}{2v} - \dots$$

convergirt nur bei bestimmter Summationsfolge. Indefs

$$\left(-\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{4}\right) + \dots + \left(\frac{1}{2^{\nu}-1} - \frac{1}{2^{\nu}}\right) + \dots$$

oder

$$-\frac{1}{1.2} + \frac{1}{3.4} + \dots + \frac{1}{(2^{\nu}-1)2^{\nu}} + \dots$$

convergiert und mithin

$$\left(1 + \frac{1}{2}\right) \left(1 - \frac{2}{3.4}\right) \left(1 - \frac{2}{5.6}\right) \dots$$

endlich ist, wird

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{2^{\nu}} + \dots$$

und

$$\frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \dots + \frac{1}{2^{\nu}-1} + \dots$$

unendlich, und von den Producten

$$\prod_{\nu=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{2^{\nu}}\right) \quad \text{und} \quad \prod_{\nu=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{2^{\nu}+1}\right)$$

divergirt das erste nach Unendlich, das zweite nach Null, ohne daß ein Factor verschwindet.

Die von der Anordnung der Factoren abhängigen unendlichen Producte haben nicht den Charakter der Producte, darum führen wir sie ebensowenig wie die bedingt convergenten unendlichen Reihen in die Rechnung ein.

Zweites Capitel.

I. Abschnitt.

Veränderliche Größen, Größenmengen.

§ 12. Definition der algebraischen rationalen ganzen und gebrochenen Ausdrücke.

Mit den in dem vorigen Capitel gewonnenen Zahlengrößen haben wir zu operiren.

Ist eine endliche Anzahl reeller oder complexer Zahlengrößen $a_1, a_2 \dots a_n$ vorgelegt und verknüpft man dieselben eine endliche Anzahl Male durch die vier Rechnungsoperationen, wobei die Division der Beschränkung unterliegt, daß der Divisor nicht Null sein darf, so erhält man Ausdrücke, deren Untersuchung den Gegenstand der *Algebra* bildet. Schließen wir die Division zunächst ganz aus, so liefert die Anwendung der drei übrigen Elementaroperationen Ausdrücke der Form:

$$A_1 a_1^{m_1^{(1)}} a_2^{m_2^{(1)}} \dots a_n^{m_n^{(1)}} + A_2 a_1^{m_1^{(2)}} a_2^{m_2^{(2)}} \dots a_n^{m_n^{(2)}} + \dots \\ + A_k a_1^{m_1^{(k)}} a_2^{m_2^{(k)}} \dots a_n^{m_n^{(k)}},$$

wo einige der (positiven) ganzen Zahlen $m_1^{(x)} \dots m_n^{(x)}$ auch den Werth Null haben können, in welchem Falle $a_r^0 = 1$ zu setzen ist, und wo die positiven und negativen ganzzahligen Größen A_x *Coefficienten* genannt werden.

Solche „*algebraische, rationale und ganze*“ Ausdrücke haben offenbar die Eigenschaft, untereinander durch die ersten drei Rechnungsarten verbunden, wieder Ausdrücke derselben Art zu geben.

Wendet man bei der Verknüpfung der Elemente a_r auch die Division an, so entstehen Quotienten ganzer Ausdrücke. Indem man ferner die durch Addition, Multiplication und Subtraction verbundenen Quotienten auf gemeinsame Nenner bringt, wird der allgemeinste *algebraische, rationale und gebrochene* Ausdruck unter der Form des Quotienten zweier ganzen Ausdrücke erscheinen.

Bei der Bildung genannter Ausdrücke wollen wir festsetzen, daß einige Elemente a_r einmal fixirte Werthe unveränderlich beibehalten, andere Elemente nach und nach andere Werthe aus unserem Größen-

system annehmen. Die ersteren Größen heißen *unveränderliche* oder *constante*, die letzteren *veränderliche* oder *variable*.

Der algebraische Ausdruck ändert seinen Werth, wenn man den Variablen verschiedene Werthe beilegt. Diese Abhängigkeit des Werthes eines Ausdruckes von den Werthen der Variablen spricht man dadurch aus, daß man den Ausdruck eine *Function der Variablen* nennt und zwar eine algebraische rationale ganze oder gebrochene Function, je nachdem die variablen Größen bei der Division nicht in Verwendung kamen oder aber auch bei dieser Rechnungsoperation zugelassen wurden.

Die algebraische rationale ganze Function ist eine Summe einer endlichen Anzahl von Gliedern der Form:

$$A_{\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m} x_1^{\nu_1} x_2^{\nu_2} \dots x_m^{\nu_m},$$

wo die constanten Coefficienten $A_{\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m}$ beliebige Zahlengrößen und die x_1, x_2, \dots, x_m die Variablen bedeuten.

Zwei Glieder der ganzen Function, in welchen die Exponenten der Variablen der Reihe nach übereinstimmen, kann man zu einem Gliede vereinigen. Sind die Exponenten einmal alle gleich Null, so hat die ganze Function ein von den Variablen freies, constantes Glied $A_{0, 0, \dots, 0}$. Kann der Exponent ν_μ ($\mu = 1, 2, \dots, m$) alle Werthe von 0 bis m_μ durchlaufen, so schreibt man die ganze Function in Form der *m*-fachen Summe:

$$\sum_{\nu_1=0}^{m_1} \sum_{\nu_2=0}^{m_2} \dots \sum_{\nu_m=0}^{m_m} A_{\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m} x_1^{\nu_1} x_2^{\nu_2} \dots x_m^{\nu_m},$$

oder einfacher:

$$\sum_{\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m=0}^{m_1, m_2, \dots, m_m} A_{\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m} x_1^{\nu_1} x_2^{\nu_2} \dots x_m^{\nu_m},$$

und hierin können einige der Coefficienten $A_{\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m}$ wieder Null sein. Die algebraische rationale gebrochene Function ist der Quotient solcher Summen.

§ 13. Unbeschränkt veränderliche Größen.

Bevor wir an die Untersuchung der eingeführten Functionen gehen können, müssen wir eine Reihe von Definitionen vorausschicken.

Wir sagten, eine Größe heißt veränderlich, wenn sie verschiedene Werthe annehmen kann. Diese Veränderlichkeit ist ganz unbestimmt, und im Allgemeinen wird eine solche Größe nicht zu verwerthen sein. Wir führen darum die *unbeschränkt veränderliche Größe* ein und verstehen darunter eine Größe, die jeden Werth unseres Größen- oder Zahlensystems annehmen kann und auch größer werden darf, als jede vorgegebene Größe.

Eine solche Variable x hat folgende Eigenschaft:

Ist x_0 ein bestimmter endlicher Werth und r eine gegebene positive (reelle) GröÙe, so gehört die Gesamtheit von Zahlengrößen x , für welche der absolute Betrag $|x - x_0|$ kleiner ist als r , ebenfalls zu den Werthen der Variablen.

Wird eine Variable als eine GröÙe x definirt, welche alle Werthe annimmt, für die $|x - x_0|$ kleiner ist als eine beliebig kleine positive GröÙe δ , — wo x_0 einen ersten Werth bezeichnet — so nennt man sie *stetig veränderlich*. Die unbeschränkt variable GröÙe ist also stetig veränderlich.

Die Gesamtheit der Werthe x , welche die Bedingung

$$|x - x_0| < r$$

erfüllen, bezeichnet man als *Umgebung von x_0* . Der Ursprung dieser Bezeichnung ist durch die geometrische Repräsentation der Variablenwerthe erklärt. Die Träger dieser Werthe sind die Punkte der *Zahlenebene*, der Träger des Werthes x_0 ist ein bestimmter *Punkt* oder eine *Stelle*, und die der genannten Bedingung unterworfenen x Werthe liegen innerhalb des um die Stelle x_0 mit dem Radius r beschriebenen Kreises. Nach der GröÙe r heißt die *Umgebung von x_0* diejenige mit dem Radius r , oder die Umgebung r der Stelle x_0 .

Es seien n von einander unabhängige unbeschränkt veränderliche Größen $x_1, x_2 \dots x_n$ vorgelegt.

Ein specielles Werthesystem $(a_1, a_2 \dots a_n)$ oder, wie wir kürzer anzeigen wollen, ein Werthesystem (a) heiÙe eine Stelle oder ein Punkt aus der Gesamtheit der Werthesysteme (x) .

Die Gesamtheit derjenigen Werthesysteme (x) , welche die Bedingungen

$$|x_1 - a_1| < \delta, \quad |x_2 - a_2| < \delta, \quad \dots |x_n - a_n| < \delta$$

erfüllen, heiÙe die Umgebung δ der Stelle (a) ; allgemeiner definirt man durch die Gesamtheit der den verschiedenen Bedingungen

$$|x_1 - a_1| < \delta_1, \quad |x_2 - a_2| < \delta_2 \dots |x_n - a_n| < \delta_n$$

genügenden Werthesysteme die Umgebung $(\delta_1, \delta_2 \dots \delta_n)$ oder (δ) der Stelle (a) .

Sind die Variablen wiederum so definirt, daß die Gesamtheit der den Ungleichungen $|x_\nu - a_\nu| < \delta_\nu$ ($\nu = 1, 2 \dots n$) mit beliebig kleinen Größen δ_ν genügenden Werthesystemen auch den Variablenwerthen angehören, so heißen sie stetig veränderlich.

Wir sagen: Die Gesamtheit der reellen Werthe, welche eine unbeschränkte Variable annehmen kann, constituirt eine einfach unendliche Mannichfaltigkeit oder eine Mannichfaltigkeit einer Dimension.

Die Gesamtheit der reellen Werthesysteme, die n von einander unabhängige, unbeschränkt veränderliche Größen $x_1, x_2 \dots x_n$ an-

nehmen können, bildet eine n -fach unendliche Mannichfaltigkeit oder eine Mannichfaltigkeit n^{ter} Dimension.

Die Gesamtheit der n unbeschränkt veränderlichen Größen

$$x_v = \xi_v + i\eta_v \quad (v = 1, 2 \dots n),$$

wo ξ_v und η_v reelle Werthe bedeuten oder unbeschränkt reelle Variablen sind, constituirt eine Mannichfaltigkeit von $2n$ Dimensionen und ein specielles Werthesystem (a_v) ist eine Stelle oder ein Punkt dieser Mannichfaltigkeit. —

Wir denken nun in der zweifach unendlichen Mannichfaltigkeit eine unendliche Menge (A) von einander verschiedener *endlicher* Punkte gegeben, die durch eine bestimmte Regel oder eine gemeinsame Definition charakterisirt seien, wie z. B. dadurch, daß in $x = \xi + i\eta$ die Coordinaten ξ und η rationale Zahlengrößen sein sollen.

Hierauf definiren wir: eine (wenn auch noch so kleine) *Umgebung* r einer Stelle x_0 der Gesamtheit von Werthen x gehört der *Punktmenge* (A) an, wenn nebst x_0 jede Stelle dieser Umgebung ein Punkt der Menge ist.

Gibt es keinen Punkt x_0 unter den gegebenen, dem eine der Menge (A) angehörige Umgebung zuzuordnen ist, so heisst die Punktmenge *discret*.

Angenommen, daß eine solche Stelle x_0 existirt, so kann man eine der Bedingung $|x - x_0| < r$ genügende Stelle x_1 herausnehmen, für die sich offenbar wieder eine der Menge (A) angehörige Umgebung r_1 finden läßt. Führt man so fort, sucht stets die Umgebung r_v einer Stelle x_v , die der der Menge (A) angehörigen Umgebung r_{v-1} von x_{v-1} entnommen ist, so constituirt die Gesamtheit von Punkten, zu denen man auf diese Weise gelangen kann, in der zweifach unendlichen Mannichfaltigkeit von x Werthen oder in der x -Ebene, wo die Variable gedeutet wird, eine Menge (A_1) von Stellen, die wir einen *Bereich* nennen. Durch die beschriebene Vermittlung einer endlichen Anzahl von Stellen kann man von jeder Stelle x_0 des Bereiches (A_1) zu jeder anderen x' gelangen, ja noch mehr, man kann sogar eine endliche Anzahl von Stellen x_v aus (A) zwischen x_0 und x' so einschalten, daß die Entfernungen

$$|x_1 - x_0|, |x_2 - x_0| \dots |x' - x_n|$$

kleiner bleiben als eine beliebige kleine Größe δ , und die Umgebungen der Stellen $x_0, x_1, x_2 \dots x_n$ mit dem Halbmesser δ der Punktmenge (A) angehören.

Man sagt, die Stellen $x_1, x_2 \dots x_n$ vermitteln einen *zusammenhängenden Übergang* oder einen *continuirlichen Weg* von x_0 nach x' . Ein Bereich (A_1) , zwischen dessen Stellen continuirliche Wege zu

legen sind, heisst ein aus einem zweifach ausgedehnten Stücke bestehendes, zusammenhängendes *Continuum*, oder Continuum kurzweg.*)

Ist x' eine Stelle aus (A) , der man eine dem Continuum (A_1) angehörige Umgebung zuordnen kann, so liegt x' *innerhalb* (A_1) und (A_1) *enthält* x' .

Gibt es unter den Stellen einer noch so kleinen Umgebung von x' solche, die (A_1) angehören und andere, die (A_1) nicht angehören, so liegt x' *auf der Begrenzung des Bereiches* (A_1) .

Eine Stelle x'' liegt *endlich ausserhalb* (A_1) , wenn man ihr eine wenn auch noch so kleine Umgebung zuordnen kann, welche keine dem Bereiche (A_1) angehörige Stellen umfasst. Die dem Continuum (A_1) angehörigen Umgebungen einer Stelle, die innerhalb (A_1) liegen, können bis an eine Stelle der Begrenzung hinanreichen, aber niemals eine solche Stelle enthalten.**)

Das Continuum (A_1) ist durch einzelne Stellen, durch eine oder mehrere Linien oder durch Punkte und Linien begrenzt.

Die Linie ist (hier etwas umständlich) als die Gesamtheit einer unendlichen Punktmenge (B) der Beschaffenheit aufzufassen, dass in jeder (selbst beliebig kleinen) Umgebung jeder Stelle von (B) unendlich viele andere Stellen dieser Menge, und noch Stellen (x'') und (x') liegen, die sich ausserhalb resp. innerhalb des Continuum (A_1) befinden.

Die eine Linie definirende Punktmenge bildet kein zweifach ausgedehntes Continuum mehr, aber nothwendig lassen sich wieder zwischen irgend zwei Stellen ξ_0 und ξ'_0 von (B) nach Annahme einer beliebig kleinen Grösse ε eine endliche Anzahl neuer Stellen $\xi_1, \xi_2 \dots \xi_r$, welche der Menge (B) angehören, den Bedingungen

$$|\xi_1 - \xi_0| < \varepsilon, \dots |\xi_r - \xi'_0| < \varepsilon$$

gemäss einschalten. Darum heisst die Punktmenge (B) *zusammenhängend* und andererseits einfach unendlich oder einfach ausgedehnt, weil sie in der zweidimensionalen Mannichfaltigkeit kein Continuum bildet.

Es ist möglich, dass unter den Stellen der ursprünglich gegebenen Punktmenge (A) solche existiren, die zwar ausserhalb (A_1) liegen, denen aber eine der Menge (A) angehörige Umgebung zuzuordnen ist. Dann gibt es mindestens ein zweites Continuum (A_2) , dessen Begrenzung theilweise mit der des ersten Continuum zusammenfallen kann. So kann man nach und nach alle Continua aus (A) herausnehmen.

Die Gesamtheit der Werthe einer stetig veränderlichen Grösse x constituirt gewiss ein Continuum. Indem sich die früheren Betracht-

*) Weierstrass, Abhandl. aus der Functionenlehre S. 71.

**) Mittag-Leffler, Acta math. Bd. 4.

tungen auf den Fall unendlicher Punktmengen (A) in der $2n$ -dimensionalen Mannichfaltigkeit ausdehnen lassen, gilt die letzte Behauptung auch für die Gesamtheit der Werthesysteme von n stetigen Veränderlichen. Die der Linie entsprechende Begrenzung des $2n$ fach ausgedehnten Continuum wird aus einer $(2n - 1)$ fach unendlichen Punktmenge zusammengesetzt sein und ferner werden die Begrenzungen durch $(2n - \nu)$ fach unendliche Punktmengen gebildet sein können, indem in der Punktmenge (A) eine Menge von Stellen existiren kann, die niemals ein mehr als $(2n - \nu)$ fach ausgedehntes Continuum zu bilden vermögen, in deren Umgebungen aber erstens unendlich viele Stellen dieser Menge selbst und ferner Stellen liegen, die sich innerhalb oder außerhalb der Menge (A) angehörnden Continua befinden. —

Gibt es unter den Werthen einer Variablen x solche, die, ohne Null zu sein, dem absoluten Betrage nach kleiner sind als eine beliebig kleine positive GröÙe δ , so sagt man, daß x *unendlich klein werden kann*.*) Ist x eine stetig veränderliche GröÙe und liegt die Stelle Null in dem Bereich der GröÙe oder auf der Begrenzung, so kann x unendlich klein werden und zwar gibt es *unendlich viele* Werthe x , für die $|x|$ kleiner wird als δ .

Die Null selbst erscheint hier im Gegensatz zu den Null werdenden oder unendlich klein werdenden Größen als eine bestimmte GröÙe, nach welcher die Werthe x convergiren.

Ein Größensystem $x_1, x_2 \dots x_n$ wird *unendlich klein*, sobald wieder die Stelle (0) in dem Bereich der Veränderlichen oder auf der Begrenzung liegt.

Stehen hierauf zwei oder mehrere Größen y und x oder y und $x_1, x_2 \dots x_n$ in einem Zusammenhange, durch welchen jeder Stelle x oder (x) ein oder mehrere (vielleicht unendlich viele) Werthe für y zugeordnet werden, und existirt nach Annahme einer beliebig kleinen positiven GröÙe ε eine Umgebung der Stelle 0 oder (0)

$$|x| < \delta; \quad |x_\nu| < \delta_\nu, \quad (\nu = 1, 2 \dots n),$$

die nur Stellen enthält, denen y Werthe von einem Betrage kleiner als ε zugeordnet sind, so sagt man, daß die GröÙe y mit den unabhängigen Variablen unendlich klein oder mit *unendlich kleinen Werthen der Variablen* unendlich klein wird.

Wird $y - b$ mit $x - a$ oder mit $x_\nu - a_\nu$ ($\nu = 1, 2 \dots n$) unendlich klein, so gebraucht man die Bezeichnung: y *nähert sich der Grenze b* , indem die GröÙe x oder das Größensystem ($x_1, x_2 \dots x_n$) nach der Stelle a oder (a) convergirt, d. h. wenn die Stelle x oder

*) Wir werden öfter die Worte *absoluter Betrag* weglassen, wenn es sich um den Vergleich complexer Größen mit positiven (reellen) Größen handelt.

(x) derart nach a oder (a) rückt, daß die Differenzen $x - a$ oder ($x_r - a_r$) unendlich klein werden.

Die Summe oder das Product y einer endlichen Anzahl stetig veränderlicher Größen wird mit den Summanden respective mit *einem* Factor unendlich klein, sofern in dem Producte keiner der übrigen Factoren eine noch angebbare GröÙe überschreitet. Der Quotient y zweier stetig veränderlicher Größen wird gewiß mit dem Dividend unendlich klein, wenn nur der Divisor nicht auch unendlich klein wird.

Eine veränderliche GröÙe wird *unendlich groß* genannt, wenn ihr absoluter Betrag größer werden kann als jede angebbare positive GröÙe. Wie die Null als Grenze unendlich klein werdender Größen aufzufassen ist, betrachtet man die Grenze der unendlich werdenden Größen als eine bestimmte GröÙe: *Unendlich*, und spricht von ihr als dem Werthe des Ausdruckes $\frac{1}{x}$, wenn $x = 0$ gesetzt wird; diesem Werthe oder dieser GröÙe (∞) kommt der Name Unendlichkeitspunkt zu, herrührend von der geometrischen Repräsentation, bei der man nur einen unendlich fernen Punkt hat, sobald die Ebene als Kugel von unendlich großem Radius aufgefaßt wird. Die Gesamtheit der (absolut genommen großen) Werthe von x , für welche $\left|\frac{1}{x}\right| < r$, heißt die Umgebung r der Stelle ∞ . Darnach legt man also dem Ausdruck $x - \infty$ die Bedeutung von $\frac{1}{x}$, und dem Ausdruck $\frac{a - \infty}{x - \infty}$ die Bedeutung von $\frac{x}{a}$ bei.

Sollte die oben benützte Punkt- oder Werthemenge (A) der zweifach unendlichen Mannichfaltigkeit Größen enthalten, deren absoluter Betrag größer ist als eine angebbare GröÙe und gehört jede einer Bedingung $\left|\frac{1}{x}\right| < r$ genügende Stelle der Menge (A) an, so enthält (A) die Umgebung des unendlich fernen Punktes und *ein Continuum erstreckt sich in das Unendliche*.

§ 14. Häufungsstelle linearer Punktmengen.

Wir müssen die unendlichen Punktmengen noch näher studiren. Wir denken vor Allem in dem Bereich der unbeschränkt reellen Variablen x' , der durch die Gesamtheit der reellen Werthe unserer Variablen x constituirt ist, eine aus einer einheitlichen Definition fließende Menge voneinander verschiedener Werthe gegeben. Dann besteht für jede solch *lineare unendliche Punktmenge* der wichtige Satz*):

In dem Bereich der reellen Variablen gibt es mindestens eine

*) Siehe Pincherle l. c.

Stelle der Beschaffenheit, daß in jeder noch so kleinen Umgebung derselben unendlich viele Stellen der Punktmenge sich befinden.

Wir setzen voraus, daß die absoluten Beträge der gegebenen Größen $(x'_1, x'_2 \dots x'_v \dots)$ endlich seien; dann können wir auch bestimmen, daß sie alle positiv seien, denn andernfalls kann man wegen der ersten Voraussetzung stets eine positive GröÙe k so angeben, daß

$$y'_v = x'_v + k \quad (v = 1, 2 \dots)$$

positiv werden.

Sind die unendlich vielen Größen x'_v nun alle positiv, größer als a und kleiner als $a + d$, so theile man das durch diese Größen definierte Intervall (Bereich) in neue Bereiche, so daß in einem Theilbereiche unendlich viele der gegebenen Größen liegen.

Bezeichnen

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2 \dots \varepsilon_n \dots$$

Größen, die nur die Werthe 0 und 1 annehmen, so lassen sich unendlich viele Größen x'_v in das Intervall

$$\text{von } a + \varepsilon_1 \frac{d}{2} = b_1 \text{ bis } b_1 + \frac{d}{2},$$

ferner in das Intervall

$$\text{von } b_2 = b_1 + \varepsilon_2 \frac{d}{2} \text{ bis } b_2 + \frac{d}{2},$$

usw., endlich in ein Intervall

$$\text{von } b_n = b_{n-1} + \varepsilon_n \frac{d}{2} \text{ bis } b_n + \frac{d}{2}$$

einschließen. Nennt man die Summe

$$\frac{\varepsilon_1}{2} + \frac{\varepsilon_2}{4} + \dots + \frac{\varepsilon_n}{2^n}$$

η_n , so wird

$$b_n = a + \eta_n d.$$

Wir behaupten, daß dann, wenn b_n noch nicht die verlangte Stelle ist, die Zahlengröße

$$b = a + d \left(\frac{\varepsilon_1}{2} + \frac{\varepsilon_2}{4} + \dots + \frac{\varepsilon_n}{2^n} + \dots \right) = a + d \cdot \eta$$

die gesuchte Stelle in dem Intervall a bis $a + d$ definiert. *)

Diese Zahlengröße ist vor Allem endlich, denn η ist nicht größer als

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \dots + \frac{1}{2^n} + \dots = \frac{1}{2} \frac{1}{1 - \frac{1}{2}} = 1.$$

Ist dann δ eine beliebig kleine vorgelegte GröÙe und n so gewählt, daß

*) Vergleiche Serret-Harnack, Lehrbuch der Differential- und Integralrechnung S. 26.

$$\frac{1}{2^n} < \delta, \quad \frac{1}{2^{n+1}} \geq \delta,$$

so wird η an die Ungleichungen gebunden sein:

$$\eta_n < \eta \leq \eta_n + \frac{1}{2^n},$$

oder:

$$\eta - \delta < \eta_n \quad \text{und} \quad \eta + \delta \geq \eta_n + \frac{1}{2^n}.$$

Dann ist aber das Intervall von b_n bis $b_n + \frac{d}{2^n}$ vollständig in dem Intervalle $(b - \delta d, b + \delta d)$ oder $(a + (\eta - \delta)d, a + (\eta + \delta)d)$ enthalten und weil dieses mit δ beliebig klein zu machen ist, fallen wirklich in jede noch so kleine Umgebung der Stelle b unendlich viele der vorgelegten Punkte.

Enthält die gegebene Punktmenge Größen x' , die größer sind als jede angebbare GröÙe, und gehören nicht alle endlichen Stellen der Menge an (in welchem Falle der frühere Satz auch hier bewiesen wäre), so greife man eine solche heraus — sie heiÙe ξ' —, setze dann

$$y = \frac{x}{x - \xi'},$$

so wird der Bereich der reellen Werthe y' gerade dem Bereich von x' entsprechen, indem

$$y' = \frac{x'}{x' - \xi'} = \frac{1}{1 - \frac{\xi'}{x'}}.$$

reell ist. Die Stellen y' liegen nicht unendlich fern, da $|y'|$ endlich bleibt und somit gibt es für die Punktmenge $(y'_1, y'_2, \dots, y'_n, \dots)$ eine ausgezeichnete Stelle der in Rede stehenden Art; sie heiÙe Y . Ihr entspricht in dem Bereiche von x' umgekehrt die Stelle:

$$X = \frac{Y\xi'}{Y-1},$$

und diese ist die gesuchte *Grenz- oder Häufungsstelle* der gegebenen Punktmenge, denn die Stellen der nächsten Umgebung von Y werden in Stellen der nächsten Umgebung von X transformirt.

Wäre $Y = 1$, so folgt $X = \infty$ und dann gibt es in jedem noch so kleinen Bereiche, für welchen $\left|\frac{1}{x'}\right| < \delta$, unendlich viele der gegebenen Stellen. —

Man kann diese Betrachtungen auf den Fall ausdehnen, wo in dem Bereiche der n von einander unabhängigen unbeschränkten aber reellen Variabeln $(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$, (also in einer Mannichfaltigkeit von n Dimensionen), unendlich viele von einander verschiedene (positive) Stellen (x') gegeben sind, die man in bestimmter Folge geordnet denken

mag; z. B. dadurch daß zwei Stellen (x') und (\bar{x}') dann als aufeinander folgend angesehen werden, wenn $|x'_1| < |\bar{x}'_1|$ ist; sollte es aber zwei Stellen geben, denen dieselben Werthe x'_1 zukommen, so folge (x') auf (\bar{x}') , wenn $x'_2 < \bar{x}'_2$ usw.

In der n -fach unendlichen Mannichfaltigkeit existirt wieder mindestens eine Stelle, derart, daß in jeder beliebig kleinen Umgebung (δ) derselben unendlich viele der gegebenen Punkte enthalten sind.

Will man zeigen, daß auch die unendliche Punktmenge in dem zweifach ausgedehnten Bereiche der unbeschränkten Variablen

$$x = \xi + i\eta$$

eine Häufungsstelle besitzt ($b = \beta_1 + \beta_2 i$), so daß in jeder noch so kleinen Umgebung r von b unendlich viele der vorgegebenen Stellen $x' = \xi' + i\eta'$ liegen, so setze man b aus den Häufungsstellen β_1 und β_2 der Größensmengen ξ' resp. η' zusammen und beweise, daß sich nach Annahme zweier beliebig kleinen Größen δ_1 und δ_2 , welche der Bedingung $\delta_1^2 + \delta_2^2 < r^2$ genügen, unendlich viele reelle Werthe ξ' und η' finden lassen, für welche

$$|\xi' - \beta_1| < \delta_1, \quad |\eta' - \beta_2| < \delta_2,$$

denn dann gibt es auch unendlich viele Größen x' , die die Bedingung $|x' - b| < r$ erfüllen.

In entsprechender Weise gehe man in dem Falle vor, wo die Punktmenge in dem $2n$ -fach ausgedehnten Bereiche der n (complexen) Variablen x_1, x_2, \dots, x_n gegeben ist. Es gibt auch hier mindestens eine Häufungsstelle.

§ 15. Abgeleitete Punktmenngen.*)

Ist irgend eine unendliche lineare Punktmenge P gegeben, d. h. eine unendliche Menge verschiedener Punkte, so ist mit dieser eine zweite Punktmenge definirt, nämlich die der Häufungs- oder Grenzstellen. Man nennt die Gesammtheit der Grenzstellen die *erste abgeleitete Punktmenge* von P und bezeichnet sie mit $P^{(1)}$.

Die Punkte von $P^{(1)}$ brauchen der Menge P nicht anzugehören und ebensowenig ist die Menge P in $P^{(1)}$ enthalten. Heißt die Gesammtheit der in P aber nicht in $P^{(1)}$ vorkommenden Stellen Q , dann kann man jedem Punkte von Q eine Umgebung zuordnen, welche keine weiteren Stellen aus Q enthält, und die abgeleitete Menge $Q^{(1)}$ kann mit Q keine Stelle gemein haben. Man nennt die Punkte Q *isolirte Punkte*.

Besteht die Punktmenge $P^{(1)}$ aus unendlich vielen Stellen, so besitzt dieselbe eine erste abgeleitete Punktmenge $P^{(2)}$, die die zweite

*) Vergleiche die Untersuchungen von Cantor in den Mathemat. Annalen.

Abgeleitete von P heisst. — $P^{(2)}$ braucht nicht alle Stellen von $P^{(1)}$ zu enthalten, aber jede Stelle von $P^{(2)}$ gehört jetzt $P^{(1)}$ an, denn in jeder Umgebung einer Stelle von $P^{(2)}$ gibt es unendlich viele Stellen von $P^{(1)}$ und in jeder Umgebung dieser Stellen unendlich viele Punkte der Menge P . Der Ableitungsprozess fördert also aus P höchstens einmal neue Stellen.

In der Bildung abgeleiteter Punktmengen kann man weiter gehen und die ν^{te} Ableitung von P , d. i. die erste Ableitung von $P^{(\nu-1)}$ aufsuchen; stets wird $P^{(\nu)}$ in $P^{(\nu-1)}$, in $P^{(\nu-2)}$ usw., endlich in $P^{(1)}$ enthalten sein. Kommt man bei dieser Succession zu einem Ende, indem eine abgeleitete Menge $P^{(n)}$ nur aus einer endlichen Anzahl von Stellen zusammengesetzt ist und $P^{(n+\nu)}$ für jedes ν keine Stellen enthält, so heisst die Punktmenge von der n^{ten} Ordnung. Man zeigt dies durch die Schreibweise an:

$$P^{(n+1)} \equiv 0.$$

Beispiele: 1) Die erste abgeleitete Punktmenge der gegebenen Menge $\left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n}, \dots\right)$ besteht aus der Stelle Null und es ist $P^{(2)} \equiv 0$.

2) Die erste Abgeleitete der Punktmenge, welche durch die innerhalb des Bereiches von 0 bis 1 befindlichen rationalen Zahlengrößen definirt ist, besteht aus allen Punkten des Intervalles einschließlich der durch die Stellen 0 und 1 gebildeten Grenzen und jede folgende abgeleitete Menge enthält dieselben Stellen.

3) Eine irrationale Zahlengröße n^{ter} Ordnung war durch eine aus Zahlengrößen $(n-1)^{\text{ter}}$ Ordnung gebildete Fundamentalreihe definirt, die irrationale Zahlengröße erster Ordnung durch eine aus rationalen Größen zusammengesetzte Fundamentalreihe. Sucht man die den rationalen Größen entsprechende Punktmenge, welche eine irrationale Zahlengröße n^{ter} Ordnung definirt, so ist dieselbe durch die Identität $P^{(n+1)} \equiv 0$ charakterisirt.

Bezeichnet man das System der zweien Punktmengen P_1 und P_2 gemeinsamen Stellen mit $D(P_1, P_2)$ und nennt diese Menge den gemeinsamen Theiler von P_1 und P_2 , so erhält der früher ausgesprochene Hauptsatz einer Menge Q isolirter Stellen die Form:

$$D(Q, Q^{(1)}) \equiv 0,$$

und die Beziehung auf einander folgender abgeleiteter Punktmengen ist in der Formel enthalten:

$$D(P^{(\nu)}, P^{(\nu+1)}) \equiv P^{(\nu+1)}.$$

Bezeichnet man die durch Vereinigung zweier Punktmengen P_1 und P_2 ohne gemeinsamen Theiler entstehende Punktmenge P mit $P_1 + P_2$, so ist die frühere Punktmenge P mit der ersten Abgeleiteten

$P^{(1)}$ und der isolirten Menge Q in der nachfolgenden Weise zu charakterisiren:

$$P \equiv Q + D(P, P^{(1)}),$$

d. h. jede Punktmenge P ist als Vereinigung einer isolirten Menge und einer Theilmenge von $P^{(1)}$ darzustellen.

Ist P selbst eine abgeleitete Punktmenge, so wird diese Theilmenge von $P^{(1)}$ $P^{(1)}$ selbst, denn es ist:

$$P^{(v)} \equiv Q_v + D(P^{(v)}, P^{(v+1)}) \equiv Q_v + P^{(v+1)}$$

und $Q_v \equiv P^{(v)} - P^{(v+1)}$ ist eine isolirte Menge. So ersieht man auch, daß die erste abgeleitete Punktmenge als Vereinigung isolirter Mengen aufzufassen ist, denn es gilt:

$$P^{(1)} \equiv (P^{(1)} - P^{(2)}) + (P^{(2)} - P^{(3)}) + \dots + (P^{(n-1)} - P^{(n)}) + P^{(n)}$$

oder

$$P^{(1)} \equiv (P^{(1)} - P^{(2)}) + (P^{(2)} - P^{(3)}) + \dots,$$

je nachdem $P^{(1)}$ von der $(n-1)^{\text{ten}}$ Ordnung ist, oder der Ableitungsproceß im Endlichen keinen Abschluß erreicht.

Eine Punktmenge P , welche ihre erste abgeleitete Punktmenge enthält (wo $D(P, P^{(1)}) \equiv P^{(1)}$ ist), heiße eine *abgeschlossene*. Für diese ist:

$$P \equiv Q + P^{(1)},$$

und weil $D(Q, Q^{(1)}) \equiv 0$ ist, so muß $Q^{(1)}$ in $P^{(1)}$ als Theiler enthalten sein. Enthält P neben Q und $Q^{(1)}$ noch eine Punktmenge R , so gilt:

$$P \equiv Q + Q^{(1)} + R, \quad Q^{(1)} + R \equiv P^{(1)}.$$

Während in hinlänglich kleinen Umgebungen der Stellen von Q keine Stellen dieser Menge existiren, gibt es in jeder Umgebung der Stellen von R Stellen, die R selbst angehören, folglich gehört R seiner ersten abgeleiteten Punktmenge $R^{(1)}$ an:

$$D(R, R^{(1)}) \equiv R.$$

Ferner ist nicht bloß $D(R^{(1)}, R^{(2)}) \equiv R^{(2)}$, sondern auch

$$D(R^{(1)}, R^{(2)}) \equiv R^{(1)},$$

d. h. $R^{(2)}$ enthält alle Stellen von $R^{(1)}$ und keine anderen mehr. Der Ableitungsproceß bringt demnach an der Menge $R^{(1)}$ keine Aenderung hervor.

Wir schließen diese Erörterungen über Punktmengen mit der nunmehr einleuchtenden Bemerkung: Nimmt man aus dem Bereich der unbeschränkt veränderlichen Größe $x = \xi + i\eta$ eine abgeschlossene Punktmenge heraus, von der kein Theil ein zweifach ausgedehntes Continuum bildet, so werden in dem Bereich ein oder mehrere Continua entstehen.

§ 16. Obere und untere Grenze unendlich vieler reeller
Zahlengrößen.

Wir kommen jetzt zu neuen Begriffen, denen der oberen und unteren Grenze unendlich vieler reeller positiver Zahlengrößen x' , welche im Allgemeinen keine Fundamentalreihe constituieren sollen.

Wir behaupten: Es gibt eine Zahlengröße G , welche von den gegebenen Größen x' an Größe nicht übertroffen wird und die Beschaffenheit hat, daß entweder gewisse x' gleich G sind oder doch Größen x' innerhalb des beliebig kleinen Intervalles G bis $G - \delta$ liegen. Sie heißt die *obere Grenze*. Die *untere Grenze* ist eine Größe g der Beschaffenheit, daß keine der Größen x' kleiner ist als g , aber Größen x' existieren, welche in das beliebig kleine Intervall g bis $g + \delta$ fallen oder g gleich sind.

Der Beweis für das Vorhandensein dieser Grenzen läßt sich leicht an den für die Häufungsstelle einer Punktmenge anknüpfen, doch ziehen wir vor, einige Modificationen in der Beweisführung eintreten zu lassen, die bei der Wichtigkeit dieser Art von Untersuchungen am Platze sein dürften.

Wir setzen fest, daß alle Größen x' endlich seien. Wenn sie somit nicht über eine angebbare Größe hinausgehen, kann man in der Reihe rationaler Größen:

$$0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \dots, \frac{m}{n}, \dots,$$

wo $n > 1$ sein mag, ein erstes Glied $\frac{\mu_1}{n}$ finden, welches größer ist als alle Größen x' , dann gibt es aber Größen x' , die größer oder gleich $\frac{\mu_1 - 1}{n}$ sind. Ist niemals $x' > \frac{\mu_1 - 1}{n}$, aber $x' = \frac{\mu_1 - 1}{n}$, so ist $\frac{\mu_1 - 1}{n}$ die obere Grenze. Andernfalls sei in der weiteren Reihe:

$$0, \frac{1}{n^2}, \frac{2}{n^2}, \dots, \frac{m}{n^2}, \dots$$

$\frac{\mu_2}{n^2}$ das erste Glied, welches größer ist als alle Größen x' .

Es ist dann

$$\frac{\mu_1 - 1}{n} < \frac{\mu_2}{n^2}, \quad \frac{\mu_1}{n} > \frac{\mu_2 - 1}{n^2}$$

oder

$$\mu_1 n - n < \mu_2, \quad \mu_1 n > \mu_2 - 1$$

und daher

$$\mu_1 n \geq \mu_2, \quad \frac{\mu_1 - 1}{n} < \frac{\mu_2}{n^2} \leq \frac{\mu_1}{n}.$$

Definirt man in derselben Weise die Größen:

$$\frac{\mu_3}{n^3}, \frac{\mu_4}{n^4}, \dots, \frac{\mu_m}{n^m}, \dots$$

für die dann die analogen Ungleichungen gelten:

$$\frac{\mu_{v-1} - 1}{n^{v-1}} < \frac{\mu_v}{n^v} \leq \frac{\mu_{v-1}}{n^{v-1}},$$

und bildet die Gröfse:

$$G = \frac{\mu_1}{n} + \left(\frac{\mu_2}{n^2} - \frac{\mu_1}{n} \right) + \left(\frac{\mu_3}{n^3} - \frac{\mu_2}{n^2} \right) + \dots,$$

so ist diese die verlangte endliche obere Grenze.

Bringt man G auf die Form:

$$G = \frac{\mu_1}{n} - \sum_{x=1}^{\infty} \frac{n^{\mu_x - \mu_{x+1}}}{n^{x+1}},$$

oder schreibt nach Weglassung der ersten $v - 1$ Gröfse $\frac{\mu_x}{n^x}$ und $-\frac{\mu_x}{n^x}$:

$$G = \frac{\mu_v}{n^v} - \sum_{x=v}^{\infty} \frac{n^{\mu_x - \mu_{x+1}}}{n^{x+1}}$$

und beachtet die Ungleichungen:

$$n\mu_x - \mu_{x+1} < n \quad (x = v, v + 1, \dots),$$

so wird die unter dem Summenzeichen stehende Gröfse kleiner als $\frac{1}{n^x}$. Man kann darnach eine positive Gröfse $h < 1$ so bestimmen, dafs

$$G = \frac{\mu_v}{n^v} - h \frac{1}{n^v} \frac{1}{1 - \frac{1}{n}}$$

wird, folglich ist G wirklich endlich, denn n war gröfser als 1.

Führt der beschriebene Procefs nicht zum Ende, so ist die durch unsere unendliche Reihe definirte Gröfse G so beschaffen, dafs kein x' gröfser ist als G und in dem Intervalle G bis $G - \delta$ Zahlengröfse x' liegen. Wäre nämlich $x' > G$, so gibt es auch ein δ , für welches noch

$$x' > G + \delta$$

ist. Wählt man hierauf ein ν , der Bedingung

$$h \frac{1}{n^\nu} \frac{1}{1 - \frac{1}{n}} = \frac{h}{n^\nu} \frac{n}{n-1} < \delta$$

entsprechend, so wird

$$G + \delta > \frac{\mu_\nu}{n^\nu},$$

doch weil gemäß der Definition von μ_ν keine Gröfse x' existiren, die gröfser sind als $\frac{\mu_\nu}{n^\nu}$, kann unsere Annahme nicht richtig sein und es ist jedenfalls $x' \geq G$. Da aber

$$G < \frac{\mu_\nu}{n^\nu}$$

ist und man stets ein ν entsprechend einer beliebig kleinen GröÙe δ so bestimmen kann, daÙ neben der letzten Ungleichung auch die folgende gilt:

$$G - \delta < \frac{\mu_{\nu-1}}{n^\nu}$$

— man hat ja nur $\frac{1}{n^\nu} \geq \delta$ zu machen — so gibt es in dem Intervall von G bis $G - \delta$ GröÙen x' , denn es existiren den Definitionen zufolge GröÙen $x' \geq \frac{\mu_\nu - 1}{n^\nu}$.

Sind unter den GröÙen x' solche, die gröÙer sind als eine beliebig vorgegebene GröÙe, so ist die obere Grenze $G = \infty$, und in jeder Umgebung der Unendlichkeitsstelle $\left| \frac{1}{x} \right| < \delta$ gibt es GröÙen x' . Zum Beweise benütze man die schon oben verwendete Transformation:

$$y = \frac{x}{x - \xi}.$$

In genau derselben Weise folgt die Existenz der unteren Grenze. Enthält die gegebene GröÙenmenge positive und negative GröÙen x' , so trenne man diese, suche die obere Grenze der positiven GröÙen und andererseits die der absoluten Beträge der negativen GröÙen. Die letztere ist nach Aenderung des Zeichens die untere Grenze der gegebenen GröÙen.

Es bedarf kaum der Erwähnung, daÙ die Häufungsstellen unserer Punktmengen mit den hier bestimmten Grenzen einer unendlichen Anzahl von ZahlengröÙen zusammenfallen können, aber durchaus nicht übereinstimmen müssen, denn die Grenzen waren nicht dadurch definiert, daÙ in jeder Umgebung derselben unendlich viele, sondern überhaupt gegebene GröÙen liegen.

§ 17. Von reellen Variabeln abhängige stetig veränderliche GröÙen.

Der Begriff der oberen und unteren Grenze unendlich vieler reeller ZahlengröÙen wird dort von Wichtigkeit, wo wir einer mit einer oder mehreren unbeschränkt oder stetig veränderlichen GröÙen in derartigem Zusammenhang stehenden GröÙe y begegnen, daÙ jedem Werthe oder Werthsysteme der Variabeln (x resp. $x_1, x_2 \dots x_n$), das einem continuirlichen Bereiche entnommen ist, ein oder mehrere bestimmte Werthe der GröÙe y zugehören. Wir zeigen diese Abhängigkeit der GröÙe y von x oder $x_1, x_2 \dots x_n$ durch die Schreibweise an:

$$y = f(x) \quad \text{oder} \quad y = f(x_1, x_2 \dots x_n),$$

und lesen vorderhand nur, y ist eine von x oder $x_1, x_2 \dots x_n$ ab-

hängige Größe der genannten Art. Unter $f(x')$ oder $f(x'_1, x'_2 \dots x'_n)$ verstehen wir dann die Werthe von y an der Stelle x' oder (x') .

Es sei zunächst y eine von der reellen Variablen x' abhängige Größe, die für jeden innerhalb des durch die Stellen $x' = a$ und $x' = b$ begrenzten Bereiches liegenden Werthes x' einen bestimmten endlichen und reellen Werth y' besitze, dann haben die unendlich vielen bestimmten Werthe y' eine obere und untere Grenze G und g , für die der folgende Satz gilt:

Ist G die obere Grenze derjenigen Werthe von y , welche den innerhalb des Intervalles von a bis b liegenden Werthen von x' zugehören, so gibt es in diesem Intervalle mindestens eine Stelle $x' = X$ der Beschaffenheit, daß die obere Grenze der Werthe y , welche den in beliebig kleiner Umgebung von X liegenden x' Werthen entsprechen, immer noch G bleibt.

Der Satz für die untere Grenze g lautet analog. Zum Beweise suche man wieder in der Reihe rationaler Größen

$$0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \dots, \frac{m}{n}, \dots$$

wo $n > 1$ ist, zwei Größen $\frac{p}{n}$ und $\frac{p+q}{n}$, welche das Intervall von a bis b einschließen, theile das so gewonnene neue Intervall in q gleiche Theile ab, dann gibt es in jedem derselben für die den x' Werthen entsprechenden y Werthe eine obere Grenze und mindestens in einem Intervalle etwa von $\frac{\mu_1}{n}$ bis $\frac{\mu_1+1}{n}$ ist diese obere Grenze gerade G . Durch die weitere Reihe

$$0, \frac{1}{n^2}, \frac{2}{n^2}, \dots, \frac{m}{n^2}, \dots$$

wird wieder mindestens ein Intervall etwa von $\frac{\mu_2}{n^2}$ bis $\frac{\mu_2+1}{n^2}$ zu bestimmen sein, in welchem die den x' Werthen zugeordneten y Werthe die obere Grenze G besitzen. Es ist aber

$$\frac{\mu_1}{n} < \frac{\mu_2+1}{n^2}, \quad \frac{\mu_2}{n^2} < \frac{\mu_1+1}{n}$$

$$n\mu_1 < \mu_2 + 1, \quad \mu_2 < n\mu_1 + 1$$

oder

$$n\mu_1 \leq \mu_2, \quad \mu_2 + 1 \leq \mu_1 + n,$$

und deshalb

$$\frac{\mu_1}{n} \leq \frac{\mu_2}{n^2}, \quad \frac{\mu_2+1}{n^2} \leq \frac{\mu_1+1}{n},$$

d. h. das neue Intervall liegt ganz in dem ersten.

In der Bildung neuer Intervalle gehe man in der angegebenen Weise weiter, so daß stets

$$0 < \mu, -\nu\mu_{-1} < n$$

bleibt, wie in dem Falle $\nu = 2$. Erhält man niemals einen Werth

$\frac{\mu_\nu}{n^\nu}$, dem der Werth $y = G$ entspricht, so definiert der Ausdruck:

$$\begin{aligned} & \frac{\mu_1}{n} + \left(\frac{\mu_2}{n^2} - \frac{\mu_1}{n} \right) + \left(\frac{\mu_3}{n^3} - \frac{\mu_2}{n^2} \right) + \dots \\ &= \frac{\mu_1}{n} + \frac{\mu_2 - n\mu_1}{n^2} + \frac{\mu_3 - n\mu_2}{n^3} + \dots \end{aligned}$$

oder

$$\frac{\mu_\nu}{n^\nu} + \sum_{x=1}^{\infty} \left(\frac{\mu_{\nu+x}}{n^{\nu+x}} - \frac{\mu_{\nu+x-1}}{n^{\nu+x-1}} \right)$$

die verlangte Stelle X . Wegen der genannten Ungleichungen ist erstens

$$X < \frac{\mu_1}{n} + \frac{1}{n-1} \quad \text{und} \quad \frac{\mu_1}{n} \leq X < \frac{\mu_1}{n} + \frac{1}{n-1}$$

und analog

$$\frac{\mu_\nu}{n^\nu} \leq X < \frac{\mu_\nu}{n^\nu} + \frac{1}{n^\nu} \frac{1}{1 - \frac{1}{n}},$$

und zweitens wegen

$$\begin{aligned} \mu_\nu - \nu\mu_{\nu-1} &\leq n-1 \\ \frac{\mu_\nu}{n^\nu} &\leq X < \frac{\mu_{\nu+1}}{n^\nu}. \end{aligned}$$

Ist hierauf eine beliebig kleine Gröfse δ vorgelegt, und wählt man ν der Bedingung gemäß $\frac{1}{n^\nu} < \delta$, so fällt das Intervall von $\frac{\mu_\nu}{n^\nu}$ bis $\frac{\mu_{\nu+1}}{n^\nu}$, in welchem die y Werthe die obere Grenze G haben, ganz in die Umgebung δ der Stelle $x' = X$ oder innerhalb des Intervalles von $X - \delta$ bis $X + \delta$; also in der That ist die obere Grenze der y Werthe in beliebig kleiner Umgebung der Stelle $x' = X$ immer noch G .

Ist der $x' = X$ entsprechende y -Werth genau gleich G , so heifst die obere Grenze das *Maximum* der Gröfse y , und g heifst in dem analogen Falle das *Minimum*.

Da die Grenzen unendlich vieler Gröfsen nicht zu diesen letzteren gehören müssen, ist nicht nothwendig, dafs eine Gröfse y den Maximal- und Minimalwerth erreicht, wir können nur behaupten, dafs sie denselben beliebig nahe kommt.

Nun ist auch der Satz verständlich: Wenn die Werthe y einer Gröfse K beliebig nahe kommen, so existirt mindestens eine Stelle derart, dafs in deren nächster Umgebung Stellen x' liegen, denen der Gröfse K beliebig nahe kommende y -Werthe entsprechen. —

Jetzt wollen wir Gröfsen y namhaft machen, welche einem Werthe K und ihren Grenzen G und g nicht blos beliebig nahe kommen, sondern diese Werthe wirklich annehmen.

Existirt in dem Bereiche der Variablen x ein solches Gebiet (A), daß nach Annahme einer beliebig kleinen Größe δ für jede Stelle x_0 innerhalb (A) eine Umgebung r_0 anzugeben ist, die nur Stellen x' umfaßt, deren zugehörige Werthe y' die Bedingung

$$|y' - y_0| = |f(x') - f(x_0)| < \delta$$

erfüllen, so heißt y eine in dem Gebiete (A) von x abhängige, *stetig veränderliche* Größe.

Ebenso heißt eine von n Variablen x_1, x_2, \dots, x_n abhängige Größe y in einem continuirlichen Bereiche (A) *stetig veränderlich*, wenn nach Annahme einer beliebig kleinen positiven Größe δ für jede Stelle ($x^{(0)}$) innerhalb (A) eine solche Umgebung angegeben werden kann, daß für alle Stellen ($x^{(1)}$) dieser Umgebung der absolute Betrag

$$|f(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}) - f(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})| < \delta$$

wird.

Ist nun y eine für jeden Werth x eines Intervalles (A) der (wieder reellen) Variablen *stetig veränderliche*, endliche Größe, die für alle Werthe einschließlic der Grenzstellen des Bereiches

$$(x = a, x = b = a + d)$$

definiert ist, so *erreicht* y für einen bestimmten Werth X *die obere Grenze* G .

Theilt man das Intervall in der früheren Weise ab, und nennt die Endpunkte der aufeinanderfolgenden Intervalle

$$a_1, b_1; a_2, b_2; \dots, a_v, b_v; \dots$$

so kommt man entweder auf eine Stelle, bei welcher der Werth von y gleich G ist, und dann ist die Behauptung erwiesen, oder der Theilungsproceß ist unbegrenzt fortsetzbar. Dann definiren die Grenzstellen der Punktmengen:

$$a_1, a_2 \dots a_v, \dots$$

$$b_1, b_2 \dots b_v, \dots$$

eine Stelle X und für diese ist $f(X) = G$. Wäre nämlich $f(X)$ um eine endliche Größe k von G verschieden, also

$$f(X) = G - k,$$

so könnte y an der Stelle X nicht stetig sein.*)

In der That kann man für die stetig veränderliche Größe y nach Annahme einer beliebig kleinen Größe δ eine Umgebung der Stelle X so ausfindig machen, daß für jede Stelle dieser Umgebung

$$(x' = X - \xi, x' = X + \xi)$$

$$|f(x') - f(X)| < \delta$$

wird. In das Intervall von $X - \xi$ bis $X + \xi$ fällt aber ein Intervall

*) Vergleiche Serret l. c.

von a , bis b , und zu diesem gehören y Werthe, die von G beliebig wenig abweichen. Setzt man also

$$f(x') = G - \varepsilon,$$

wo ε beliebig klein ist, so muß auch

$$|G - \varepsilon - f(X)| = |G - \varepsilon - (G - k)| = |k - \varepsilon| < \delta$$

sein, und das ist unmöglich, wenn δ und ε beliebig klein sind. Man muß $k = 0$ setzen und damit folgt

$$f(X) = G,$$

d. h. *die innerhalb eines Intervalles von $x = a$ bis $x = b$ einschliesslich dieser Grenzen stetige und endliche GröÙe y erreicht die obere Grenze, sie hat ein Maximum und ebenso ein Minimum.*

Besitzt ferner y an den innerhalb des Intervalles liegenden Stellen x_1 und x_2 die bestimmten (endlichen) Werthe $f(x_1)$ und $f(x_2)$, so kann man in gleicher Weise zeigen, daß y für die innerhalb des Theilbereiches von x_1 bis x_2 gelegenen Stellen jeden Werth annimmt, der zwischen $f(x_1)$ und $f(x_2)$ gelegen ist.

Die stetig veränderliche GröÙe $y = f(x)$ überspringt demnach keinen innerhalb ihres Werthbereiches liegenden Werth, *sie ist continuirlich.*

Dieselben Betrachtungen lassen sich durchführen, wenn man eine GröÙe y mit n reellen Veränderlichen x_1, x_2, \dots, x_n so verbunden denkt, daß jeder Stelle eines zusammenhängenden Bereiches der n fach ausgedehnten Mannichfaltigkeit (einschliesslich der Grenzen) bestimmte reelle Werthe von y zugehören.

Diese Werthe haben eine obere und untere Grenze. Im Innern oder auf der Begrenzung des genannten Bereiches der Variablen gibt es eine Stelle (a) derart, daß die Werthe von y , welche den Stellen aus einer beliebig kleinen Umgebung von (a) zugehören, der oberen Grenze beliebig nahe kommen, und diese Grenze wird erreicht, wenn y eine stetig veränderliche GröÙe ist. —

Indem wir bemerken, daß die in einem Intervall der reellen Variablen x endliche reelle und stetig veränderliche GröÙe $y = f(x)$ an einer Stelle x' des Intervalles denjenigen Werth hat, welcher die Grenze der (den nach x' convergirenden Variablenwerthen zugehörigen) y Werthe bildet, und umgekehrt eine GröÙe y in einem Intervalle dann stetig zu nennen ist, wenn sie diese Eigenschaft hat, weil man nach Annahme einer GröÙe δ' stets eine Umgebung von x' so finden kann, daß für alle Stellen x derselben

$$|f(x) - f(x')| < \delta'$$

wird und die genannte Umgebung nach Wahl einer GröÙe δ auch so zu bestimmen ist, daß für jedes x' des ganzen Intervalles dieselbe Ungleichung besteht:

$$|f(x) - f(x')| < \delta,$$

so folgt leicht der nachstehende Satz:

Wenn die Werthe einer von x abhängigen reellen stets positiven Größe y bei zunehmendem positiven x selbst wachsen oder abnehmen und in der einfach unendlichen Mannichfaltigkeit einen von den Stellen A und B begrenzten continuirlichen Bereich constituiren, so ist y stetig veränderlich.

Es nehme y mit x zu und x_1 und x_2 seien zwei Werthe von x , denen y_1 und y_2 zugehören; ferner sei $x_1 < x_2$ und deshalb $y_1 < y_2$. Bezeichnet dann x' einen in dem Intervall von x_1 bis x_2 liegenden Werth, so wird das zugehörige y' zwischen y_1 und y_2 liegen. Umgekehrt gehört der zwischen y_1 und y_2 liegende y -Werth zu einem Werthe x des Bereiches mit den Grenzstellen x_1 und x_2 . — y_1 und y_2 bilden deshalb die untere und obere Grenze der Werthe y für $x > x_1$ resp. $x < x_2$, d. h. y_1 ist die Grenze der Werthe y , wenn das in dem Intervalle von x_1 bis x_2 liegende x nach der Stelle x_1 convergirt und y_2 die Grenze der Werthe y , wenn x nach x_2 convergirt, aber dann hat y an einer beliebigen Stelle x_0 des Bereiches von x denjenigen Werth y_0 , für welchen $|y - y_0|$ zugleich mit $|x - x_0|$ unendlich klein wird, denn wie nahe an y_0 auch $y = y_0'$ gewählt werde, es gibt unter den zu den Stellen der Umgebung von x_0 gehörigen y -Werthen stets einen mit y_0 zusammenfallenden oder zwischen y_0' und y_0 gelegenen Werth. Darnach ist y auch stetig veränderlich. —

Daran schliessen wir endlich eine Untersuchung über die von einer stetig veränderlichen complexen Größe x abhängige stetig veränderliche Größe $y = f(x)$.

Wir sagen: y ist in der Umgebung einer Stelle x_0 stetig veränderlich, wenn nach Angabe einer beliebig kleinen Größe δ_0 eine solche Umgebung gefunden werden kann, daß für jede Stelle x' derselben

$$|f(x') - f(x_0)| < \delta_0.$$

Ist hierauf y in einem continuirlichen, zweifach ausgedehnten Bereiche (A) definirt und wissen wir, daß sie in der Umgebung jeder Stelle x_0 , die im Innern oder auf der Grenze eines dem Continuum (A) angehörigen endlichen Bereiches (A') liegt, stetig veränderlich ist, so läßt sich zeigen, daß y auch in dem ganzen Bereiche (A') stetig ist, d. h. man kann nach Annahme einer Größe δ für jede Stelle x_0 eine solche Umgebung ermitteln, daß für alle Stellen derselben

$$|f(x) - f(x_0)| < \delta$$

wird.

Erinnern wir uns, auf welche Weise ein zusammenhängender Bereich (A) definirt war, so können wir die folgenden Erwägungen anstellen: Sind a und b zwei Stellen innerhalb des Bereiches (A), von

denen b in der Umgebung R der Stelle a liegt, und ist R der Radius der bis an eine Stelle der Begrenzung von (A) hinanreichenden, dem Bereiche (A) angehörigen Umgebung von a , und bezeichnet d den absoluten Betrag $|b - a|$, d. h. den Abstand der beiden Stellen, so kann der Radius R_1 der bis an eine Stelle der Begrenzung von (A) hinanreichenden und (A) angehörigen Umgebung von b nicht kleiner sein als $R - d$. Ist $d < \frac{R}{2}$ und darnach $R_1 > \frac{R}{2}$, so liegt a wieder in der Umgebung R_1 von b . Es muß umgekehrt

$$R \geq R_1 - d$$

sein und es folgt, daß die Größe R_1 zwischen den Grenzen

$$R_1 - d \quad \text{und} \quad R + d$$

liegt. *)

Beachten wir jetzt, daß sich der Radius R der bis an eine Stelle der Begrenzung von (A) hinanreichenden und dem Bereiche (A) angehörigen Umgebung einer Stelle a dieses Bereiches bei stetiger Änderung von a selbst stetig ändert — wie die letzten Sätze leicht erkennen lassen —, so folgt, daß die untere Grenze R_0 derjenigen Werthe R , welche der Halbmesser für die innerhalb und auf der Begrenzung von (A') liegenden Stellen annehmen kann, mindestens an einer Stelle erreicht wird und R_0 nicht Null sein kann. Theilen wir den Bereich (A') so in eine endliche Anzahl von Bereichen, daß der Abstand irgend zweier einem Theilbereich entnommenen Stellen kleiner ist als R_0 , so liegt jeder Theilbereich in der Umgebung R_0 einer in demselben willkürlich gewählten Stelle x' .

Die an jeder Stelle von (A') stetig veränderliche Größe y ist auch in dem ganzen Bereich stetig, denn nach Angabe einer Größe δ genügt offenbar ein endlicher Theilungsproceß an den gewonnenen Bereichen zur Herstellung neuer, für die $|f(x) - f(x_0)| < \delta$ wird. Würde nämlich nur eine unendliche Anzahl neuer Theilungen zum Ziele führen können, so müßte der schließliche Bereich um eine Stelle x_0 kleiner werden als jeder beliebig kleine Bereich. Nun war aber vorausgesetzt, daß sich eine endliche, wenn auch noch so kleine Umgebung von x_0 finden läßt, wo $|f(x) - f(x_0)| < \delta_0$, und darum ist unsere Behauptung erwiesen.

*) Weierstraßs, Abhandlungen aus der Functionenlehre S. 72.

II. Abschnitt.

Rationale ganze und gebrochene Functionen einer und mehrerer Variabeln.

§ 18. Rationale ganze Functionen einer Variabeln.

Nach diesen Vorbereitungen, durch die der Begriff der veränderlichen Gröfse festgestellt wurde, gehen wir zu den schon oben definirten algebraischen Functionen zurück, von denen uns zunächst die *rationale ganze Function einer unbeschränkt veränderlichen (complexen) Gröfse x* beschäftigen soll.

Ordnen wir diese ganze Function nach den ganzzahligen Potenzen der Variabeln, so erhält sie die Gestalt

$$a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_{n-1} x + a_n.$$

Sie ist eine für jeden endlichen Werth der Variabeln bestimmte Gröfse y , die wir wieder mit $f(x)$ bezeichnen. Die Variable heifst das Argument der Function und nach dem höchsten Potenzexponenten n des Argumentes nennt man die Function vom n^{ten} Grade, so dafs die ganze Function nullten Grades eine Constante ist und die ganze Function ersten Grades (oder die lineare Function) die Form $a_0 x + a_1$ erhält.

Die Beschaffenheit der ganzen Function irgend eines Grades, welcher zufolge der Entstehung der Function durch eine endliche Anzahl arithmetischer Operationen endlich sein mufs, werden wir beurtheilen können, wenn wir die Frage, ob und für welche Werthe des Argumentes die ganze Function einen bestimmt vorgegebenen Werth a annimmt, zu beantworten im Stande sind. Die erste Frage, ob $y = f(x)$ einen bestimmten Werth annehmen kann, werden wir dahin specialisiren, dafs wir für den Werth a die Null wählen, denn die Bestimmung von Werthen x , welche der Gleichung $f(x) = a$ genügen, kommt auf die Ermittlung derjenigen Werthe zurück, welche die ganze Function $f(x) - a$ zu Null machen. Es ist also nachzusehen, ob jede ganze Function für gewisse Werthe des Argumentes verschwindet, dann nimmt sie auch jeden endlichen Werth a an.

Es wird aber ferner zu untersuchen sein, ob die ganze Function $f(x)$ eine stetig veränderliche Gröfse ist, und ob einem Continuum von x Werthen ein Continuum von Werthen y entspricht.

Wir nehmen vorerst an, dafs Zahlengröfsen existiren, für welche $f(x)$ verschwindet — sie heifsen *Nullstellen* von $f(x)$ oder *Wurzeln der Gleichung $f(x) = 0$* — und stellen die Beziehungen derselben zu

der ganzen Function fest, schicken aber noch folgende Definition voraus: Wenn sich $f(x)$ als Product zweier ganzer Functionen von x darstellen läßt, so heisst jeder Factor ein algebraischer Theiler von $f(x)$.

Darnach ist jede ganze Function nullten Grades Theiler jeder ganzen Function, denn der Quotient von $f(x)$ und einer Constanten ist wieder eine ganze Function. Von diesem Theiler sehen wir ab, gerade wie wir bei den ganzen Zahlen den selbstverständlichen Theiler Eins aufser Acht gelassen, d. h. nicht als Theiler bezeichnet haben.

Wenn die Function $f(x)$ den Theiler ersten Grades $\alpha_0 x + \alpha_1$ besitzt, verschwindet $f(x)$ für die Wurzel der Gleichung $\alpha_0 x + \alpha_1 = 0$.

Die letzte Gleichung hat nur eine Wurzel $x_1 = -\frac{\alpha_1}{\alpha_0}$, denn wäre

$$\alpha_0 x_1 + \alpha_1 = 0 \text{ und } \alpha_0 x_1' + \alpha_1 = 0,$$

so müßte das Product $\alpha_0(x_1 - x_1')$ verschwinden, ohne daß ein Factor Null wäre.

Bringt man $\alpha_0 x + \alpha_1$ auf die Form $\alpha_0(x - x_1)$, so ist auch diese Function ein Theiler von $f(x)$, und offenbar $f(x_1) = 0$.

Wenn umgekehrt die Gleichung $f(x) = 0$ die Wurzel $x = x_1$ besitzt, so ist $f(x)$ durch $x - x_1$ theilbar.

Setzt man an Stelle der Variabeln x irgend eine andere y und bildet die Formel

$$f(x) - f(y) = \alpha_0(x^n - y^n) + \alpha_1(x^{n-1} - y^{n-1}) + \dots + \alpha_{n-1}(x - y),$$

so ist $x - y$ ein Factor von $f(x) - f(y)$, denn in

$$f(x) - f(y) = (x - y) \cdot \left[\alpha_0 \frac{x^n - y^n}{x - y} + \alpha_1 \frac{x^{n-1} - y^{n-1}}{x - y} + \dots + \alpha_{n-1} \frac{x - y}{x - y} \right]$$

läßt sich jeder Ausdruck $\frac{x^r - y^r}{x - y}$ auf die Form

$$x^{r-1} + x^{r-2}y + \dots + xy^{r-2} + y^{r-1}$$

bringen, wenn nur y von x verschieden ist, was festgesetzt werden mag. Ertheilt man nach dieser Umgestaltung, durch welche $f(x) - f(y)$ die Form $(x - y) \cdot \varphi_1(x, y)$ erhält, worin $\varphi_1(x, y)$ eine ganze Function von x und y bezeichnet, y den Werth x_1 , so entsteht die Formel

$$f(x) = (x - x_1) \cdot \varphi_1(x, x_1).$$

Da $\varphi_1(x, x_1)$ eine ganze Function von x ist, so ist die verlangte Darstellung von $f(x)$ als Product zweier Theiler erwiesen.

Der Grad von $\varphi_1(x, x_1)$ ist der $(n-1)^{\text{te}}$ und x^{n-1} hat den Coefficienten α_0 . Besitzt die Gleichung $f(x) = 0$ noch eine zweite von x_1 verschiedene Wurzel x_2 , so muß in

$$f(x_2) = (x_2 - x_1) \cdot \varphi_1(x_2, x_1)$$

nothwendig $\varphi_1(x_2, x_1)$ verschwinden. Dann läßt die ganze Function von x $\varphi_1(x, x_1)$ eine Zerlegung in das Product von $(x - x_2)$ und einer ganzen Function $\varphi_2(x, x_1, x_2)$ zu, und es wird

$$f(x) = (x - x_1)(x - x_2)\varphi_2(x, x_1, x_2).$$

Man überzeugt sich leicht, daß $\varphi_2(x, x_1, x_2)$ als Function von x vom $(n-2)^{\text{ten}}$ Grade ist und die Potenz x^{n-2} wiederum den Coefficienten a_0 aufweist.

Man zeigt durch „den Schluß von ν auf $\nu + 1$ “, daß dieser Beweisgang fortzusetzen ist, d. h. angenommen, die Gleichung $f(x) = 0$ habe ν Wurzeln x_1, x_2, \dots, x_ν und dieser entspreche eine Darstellung

$$f(x) = (x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_\nu) \cdot \varphi_\nu(x, x_1, x_2, \dots, x_\nu),$$

wo φ_ν eine ganze Function $(n - \nu)^{\text{ten}}$ Grades ist, in der der Coefficient der höchsten Potenz a_0 ist, so gibt es in dem Falle einer $(\nu + 1)^{\text{ten}}$ Wurzel $x_{\nu+1}$ eine Zerlegung

$$f(x) = (x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_\nu)(x - x_{\nu+1}) \varphi_{\nu+1}(x, x_1, x_2, \dots, x_{\nu+1}),$$

wo die nach abnehmenden Potenzen geordnete ganze Function von x $\varphi_{\nu+1}$ mit dem Gliede $a_0 x^{n-(\nu+1)}$ beginnt.

In der That soll

$$f(x_{\nu+1}) = (x_{\nu+1} - x_1)(x_{\nu+1} - x_2) \dots (x_{\nu+1} - x_\nu) \varphi_\nu(x_{\nu+1}, x_1, x_2, \dots, x_\nu)$$

verschwinden, so muß $\varphi_\nu(x, x_1, x_2, \dots, x_\nu)$ für $x = x_{\nu+1}$ Null sein und kann darum in das Product von $(x - x_\nu)$ und einer ganzen Function des Argumentes x $\varphi_{\nu+1}(x, x_1, x_2, \dots, x_{\nu+1})$ zerlegt werden. Das Anfangsglied wird das bezeichnete.

Indem aus der Annahme, daß die in Rede stehende Zerlegung von $f(x)$ im Falle von ν Wurzeln gilt, die gleichartige Zerlegung bei $\nu + 1$ Wurzeln gefolgert werden kann, gilt dieselbe, welches auch die Anzahl der Wurzeln ist, denn die Darstellungen

$$f(x) = (x - x_1) \cdot \varphi_1(x, x_1) = (x - x_1)(x - x_2) \cdot \varphi_2(x, x_1, x_2)$$

wurden bewiesen; nur kann nicht angenommen werden, daß die Anzahl der Wurzeln einer Gleichung n^{ten} Grades größer als n sei. Falls $\nu = n$ gesetzt wird, ist

$$f(x) = (x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_n) \cdot \varphi_n(x, x_1, x_2, \dots, x_n)$$

und die ganze Function φ_n besitzt das Anfangsglied $a_0 x^{n-n} = a_0 x^0 = a_0$. Besäße die Gleichung $f(x) = 0$ noch eine von den früheren verschiedene Wurzel x_{n+1} , so müßte $\varphi_n = a_0$ verschwinden und es entspränge eine ganze Function

$$a_1 x^{n-1} + a_2 x^{n-2} + \dots + a_n,$$

die für n Werthe x_1, x_2, \dots, x_n verschwindet. Zerlegen wir dieselbe in das Product

$$a_1(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_{n-1}),$$

so wird ersichtlich, daß dieses nur für $x = x_n$ Null sein kann, wenn a_1 Null ist, und die ganze Function

$$a_2 x^{n-2} + a_3 x^{n-3} + \dots + a_n$$

mufs nun noch für die $n - 1$ Werthe x_1, x_2, \dots, x_{n-1} verschwinden. Es folgt wieder $a_2 = 0$, und indem man durch den Schluss von n auf $n + 1$ fortgeht, erfährt man, dafs alle Coefficienten von $f(x)$ Null sein müssen, wenn die Gleichung $f(x) = 0$ ($n + 1$) Wurzeln haben soll. *Demnach kann eine algebraische Gleichung n^{ten} Grades $f(x) = 0$ nicht mehr als n Wurzeln besitzen*, und verschwindet eine ganze Function n^{ten} Grades für $n + 1$ von einander verschiedene Werthe des Argumentes, so sind sämmtliche Coefficienten der Function Null und $f(x) = 0$ ist für jeden Werth x erfüllt.

Der zweite dieser Sätze soll eine wichtige Verwendung finden, indem wir zeigen, dafs die Coefficienten gleich hoher Potenzen zweier für beliebige Variablenwerthe übereinstimmende ganze Functionen einander gleich sein müssen.

Die beiden Functionen seien von dem n^{ten} resp. m^{ten} Grade und es sei $n \geq m$, etwa $n = m + v$; sie heißen

$$\begin{aligned} f(x) &= a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_{n-1} x + a_n \\ g(x) &= b_0 x^m + b_1 x^{m-1} + \dots + b_{m-1} x + b_m. \end{aligned}$$

Dann soll der Voraussetzung gemäß die ganze Function n^{ten} Grades:

$$\begin{aligned} f(x) - g(x) &= a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_{v-1} x^{n-(v-1)} + (a_v - b_0) x^{n-v} \\ &\quad + (a_{v+1} - b_1) x^{n-(v+1)} + \dots + (a_n - b_m) \end{aligned}$$

für beliebige also auch für ($n + 1$) bestimmte aber von einander verschiedene Werthe der Variablen verschwinden. Dazu mufs

$$\begin{aligned} a_0 = a_1 = \dots = a_{v-1} = 0, \quad a_v - b_0 = 0, \\ a_{v+1} - b_1 = 0, \dots, a_n - b_m = 0 \end{aligned}$$

sein und der Satz leuchtet ein.

Ist von zwei ganzen Functionen keine von höherem als dem n^{ten} Grade, so kann man auch sagen: Diese Functionen sind identisch gleich, wenn sie für ($n + 1$) Argumentswerthe dieselben Werthe annehmen.

Ferner besteht der Satz: Läßt sich eine ganze Function in das Product zweier oder mehrerer ganzer Functionen zerlegen, so ist die Summe der Gradzahlen der Factoren gleich dem Grade der gegebenen Function und die Coefficienten gleichnamiger Potenzen der ursprünglichen Function und des Productes sind gleich.

Die unter der Voraussetzung, dafs eine Gleichung n^{ten} Grades $f(x) = 0$ n Wurzeln habe, gewonnene Darstellung der ganzen Function $f(x)$ durch das Product von n Factoren ersten Grades und dem Coefficienten der höchsten Potenz x^n :

$$f(x) = a_0 \prod_{v=1}^n (x - x_v)$$

kann man offenbar auch aus der Annahme ableiten, dafs jede Gleichung

chung mindestens eine Wurzel besitze. Wie man aber auch die Zerlegung in Factoren ersten Grades ausführen mag, sie ist nur auf eine Weise möglich, wenn sie überhaupt existirt.

Ist nämlich auch

$$f(x) = \prod_{v=1}^n (p_v x - q_v),$$

wo p_v und q_v Constanten bezeichnen, so muß vor Allem

$$a_0 = p_1 p_2 \dots p_n$$

sein, und wenn a_0 nicht verschwindet, darf keine der Größen p_v Null sein. Setzt man nunmehr

$$f(x) = a_0 \cdot \prod_{v=1}^n \left(x - \frac{q_v}{p_v}\right),$$

so verschwindet $f(x)$ nicht bloß an den Stellen $\frac{q_v}{p_v}$ ($v = 1, 2 \dots n$), sondern auch an den Stellen $x_1, x_2, \dots x_n$. Diese Werthereihen müssen nach den früheren Sätzen übereinstimmen.

Nennen wir *Primfactor* eine ganze Function ersten Grades, welche nur für einen Werth der Variabeln verschwindet oder nur eine *Nullstelle* hat, so können wir das dem Satze: Eine zusammengesetzte Zahl kann nur auf eine einzige Art in das Product von Primzahlen zerlegt werden, analoge Theorem für die ganze Function folgendermaßen aussprechen:

Eine ganze Function kann höchstens auf eine Art in das Product von Primfactoren zerlegt werden.

Bei dieser Zerlegung können einige Primfactoren öfter auftreten, dann erhält $f(x)$ die Form

$$f(x) = a_0 (x - x_1)^{n_1} (x - x_2)^{n_2} \dots (x - x_m)^{n_m},$$

wo die ganzen Zahlen $n_1, n_2, \dots n_m$ die Summe n besitzen. Hier heißt x_μ eine n_μ -fache Nullstelle der Function $f(x)$, denn n_μ Wurzeln der Gleichung $f(x) = 0$ sind gleich x_μ .

Aus der angenommenen Zerlegung der ganzen Function

$$f(x) = a_0 \prod_{v=1}^n (x - x_v)$$

geht hervor, daß man die Coefficienten der Function $\frac{1}{a_0} f(x)$ durch ganze rationale Ausdrücke in den Wurzeln $x_1, x_2, \dots x_n$ darstellen kann. Die Ausführung der Multiplication und der Vergleich der Coefficienten gleichnamiger Potenzen in $\frac{1}{a_0} f(x)$ und $\prod (x - x_v)$ ergibt die Beziehungen:

$$\begin{aligned}
\frac{a_1}{a_0} &= - \sum_{\nu=1}^n x_\nu \\
\frac{a_2}{a_0} &= \sum_{\nu'} \sum_{\nu''} x_{\nu'} x_{\nu''} \\
&\dots \dots \dots \\
\frac{a_\mu}{a_0} &= (-1)^\mu \sum_{\nu', \nu'', \dots, \nu^{(\mu)}} x_{\nu'} x_{\nu''} \dots x_{\nu^{(\mu)}} \\
&\dots \dots \dots \\
\frac{a_n}{a_0} &= (-1)^n x_1 x_2 \dots x_n,
\end{aligned}$$

wo die μ -fache Summe in dem Ausdruck für $\frac{a_\mu}{a_0}$ über alle Producte von je μ verschiedenen der n Elemente x_1, x_2, \dots, x_n , oder wie man sagt über alle Combinationen μ^{ter} Classe auszudehnen ist. *) Die Anzahl solcher Verbindungen ist bekanntlich gleich:

$$\frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-\mu+1)}{1.2.3\dots\mu}$$

oder, wenn man für das Product $1.2.3\dots n$ das Zeichen $n!$ einführt (gelesen n Facultät), gleich:

$$\frac{n!}{\mu!(n-\mu)!}.$$

Will man diese Bezeichnung auch in dem Falle benützen, wo $\mu = n$ ist, so muß man $(n-n)! = 1$ festsetzen.

Man sieht jetzt, daß eine ganze Function n^{ten} Grades der Form

$$\varphi(x) = x^n + \alpha_1 x^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} x + \alpha_n$$

unzweideutig zu bestimmen ist, wenn festgesetzt wird, daß $\varphi(x)$ die Nullstellen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ besitze. Die Coefficienten α_μ sind die angegebenen Ausdrücke:

$$\alpha_\mu = (-1)^\mu \sum_{\nu', \nu'', \dots, \nu^{(\mu)}} \xi_{\nu'} \xi_{\nu''} \dots \xi_{\nu^{(\mu)}} \quad (\mu = 1, 2 \dots n).$$

Sind allgemein die Werthe angegeben, welche eine ganze Function n^{ten} Grades für $n+1$ bestimmte Argumentwerthe annimmt, so ist die ganze Function auch vollkommen bestimmt, denn man kann ihre Coefficienten nach einer endlichen Anzahl von Rechnungsoperationen finden.

In der That: sind die den Werthen $x = \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+1}$ zugeordneten Functionswerthe

$$\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{n+1},$$

*) Zum Beweise wende man den Schluß von n auf $n+1$ an.

so ist

$$f(x) = \sum_{v=1}^{n+1} \eta_v \frac{(x - \xi_1)(x - \xi_2) \dots (x - \xi_{v-1})(x - \xi_{v+1}) \dots (x - \xi_{n+1})}{(\xi_v - \xi_1)(\xi_v - \xi_2) \dots (\xi_v - \xi_{v-1})(\xi_v - \xi_{v+1}) \dots (\xi_v - \xi_{n+1})}$$

diejenige ganze Function n^{ten} Grades von x , welche an den bezeichneten Stellen ξ_v die vorgegebenen Werthe η_v erhält, denn in der vorstehenden Summe ist der Factor von η_v für $x = \xi_v$ gleich Eins und der Factor von η_v verschwindet an dieser Stelle.

Diese Formel heist die *Lagrange'sche Interpolationsformel*.

Diejenige ganze Function n^{ten} Grades, welche die n -fache Nullstelle $x = \xi$ besitzt und für $x=0$ den Werth $\eta = (-1)^n \xi^n$ annimmt, erhält nun die Gestalt

$$f(x) = (x - \xi)^n,$$

sie ist die n^{te} Potenz eines Binoms $(x - \xi)$, die wir mit Hilfe der obigen Ausdrücke für die Coefficienten der ganzen Function nach Potenzen von x ordnen können.

Setzt man in diesen Ausdrücken $x_1 = x_2 = \dots = x_n = \xi$, so wird

$$\frac{a_\mu}{a_0} = (-1)^\mu \frac{n!}{\mu!(n-\mu)!} \xi^\mu \text{ und speciell } \frac{a_n}{a_0} = (-1)^n \xi^n.$$

Da aber $f(0) = a_n$ den Werth $(-1)^n \xi^n$ haben soll, ist $a_0 = 1$.

Bezeichnet man die Zahlencoefficienten

$$\begin{aligned} \frac{n!}{\mu!(n-\mu)!} & \text{ mit } \binom{n}{\mu} \text{ oder } n_\mu, \\ \frac{n!}{n!} & \text{ mit } \binom{n}{0} \text{ oder } n_0^*, \end{aligned}$$

so wird

$$\begin{aligned} (x - \xi)^n &= \binom{n}{0} x^n - \binom{n}{1} \xi x^{n-1} + \binom{n}{2} \xi^2 x^{n-2} - \dots \\ &+ (-1)^\mu \binom{n}{\mu} \xi^\mu x^{n-\mu} + \dots + (-1)^n \binom{n}{n} \xi^n \end{aligned}$$

und nach Vertauschung von ξ mit $-\xi$ entsteht die Formel

$$\begin{aligned} (x + \xi)^n &= \binom{n}{0} x^n + \binom{n}{1} \xi x^{n-1} + \binom{n}{2} \xi^2 x^{n-2} + \dots \\ &+ \binom{n}{\mu} \xi^\mu x^{n-\mu} + \dots + \binom{n}{n} \xi^n. \end{aligned}$$

Mit Hilfe dieser Darstellung der n^{ten} Potenz eines Binoms oder des sogenannten binomischen Lehrsatzes, den man unabhängig von der

*) Für die zufolge ihrer Definition durch

$$\frac{n(n-1) \dots (n-\mu+1)}{1 \cdot 2 \dots \mu}$$

das einfache Gesetz

$$\binom{n}{\mu} = \binom{n}{n-\mu} \text{ oder } n_\mu = n_{n-\mu}, \quad \binom{n}{0} = \binom{n}{n} = 1$$

gilt.

Zerlegung der ganzen Function in ein Product von Primfactoren durch den Schluß von n auf $n+1$ beweisen kann, wollen wir jetzt den Werth von $f(x+h)$ bestimmen, wenn

$$f(x) = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_n$$

gegeben ist.

Es wird offenbar:

$$f(x+h) = \sum_{v=0}^n a_v \left\{ x^{n-v} + \binom{n-v}{1} x^{n-v-1} h + \dots + \binom{n-v}{\mu} x^{n-v-\mu} h^\mu + \dots + \binom{n-v}{n-v} h^{n-v} \right\}$$

und wenn man die Summe nach Potenzen von x ordnet:

$$f(x+h) = \sum_{v=0}^n x^v \left\{ \binom{n}{v} a_0 h^{n-v} + \binom{n-1}{v} a_1 h^{n-v-1} + \dots + \binom{n-\mu}{v} a_\mu h^{n-v-\mu} + \dots + \binom{v}{v} a_v \right\}.$$

Wir schreiben den Coefficienten von x^v in der entwickelten Form:

$$\frac{1}{v!} \left\{ n(n-1) \dots (n-v+1) a_0 h^{n-v} + (n-1)(n-2) \dots (n-v) a_1 h^{n-v-1} + \dots + (n-\mu) (n-\mu-1) \dots (n-\mu-v+1) a_\mu h^{n-v-\mu} + \dots + v! a_{n-v} \right\},$$

bezeichnen diese ganze Function von h mit $\frac{1}{v!} f^{(v)}(h)$ und bemerken, daß $f^{(v)}(h)$ aus der Function

$$f^{(v-1)}(h) = n(n-1) \dots (n-v+2) a_0 h^{n-v+1} + (n-1)(n-2) \dots (n-v+1) a_1 h^{n-v} + \dots + (n-\mu) (n-\mu+1) \dots (n-\mu-v+2) a_\mu h^{n-v-\mu+1} + \dots + v! a_{n-v} h + (v-1)! a_{n-v-1}$$

hervorgeht, wenn man an Stelle jeder Potenz h^m $m h^{m-1}$ und an Stelle von h_0 Null setzt.

Man nennt $f^{(v)}(h)$ die v^{te} Ableitung der Function $f(h)$, indem auch die erste dieser Functionen

$$f^{(1)}(h) = n a_0 h^{n-1} + (n-1) a_1 h^{n-2} + \dots + 2 a_{n-2} h + a_{n-1}$$

nach derselben Regel aus $f(h)$ entspringt.

Die v^{te} Ableitung ist offenbar die μ^{te} von $f^{(v-\mu)}(h)$, und die $(n+1)^{\text{te}}$ und jede folgende Ableitung der ganzen Function n^{ten} Grades $f(h)$ ist Null, denn es gilt die Formel:

$$f^{(n)}(h) = n! a_0.$$

Führt man die neu definirten Functionen in den letzten Ausdruck für $f(x+h)$ ein, so erhält man die Darstellung

$$f(x+h) = f(h) + f^{(1)}(h) \frac{x}{1} + f^{(2)}(h) \frac{x^2}{2!} + \dots + f^{(n)}(h) \cdot \frac{x^n}{n!}$$

oder nach Vertauschung der Buchstaben x und h

$$f(x+h) = f(x) + f^{(1)}(x) \frac{h}{1} + f^{(2)}(x) \frac{h^2}{2!} + \dots + f^{(n)}(x) \frac{h^n}{n!}.$$

Setzt man an Stelle von x den Werth x_1 , für h den Werth $x - x_1$ ein, so folgt die Formel

$$f(x) = f(x_1) + f^{(1)}(x_1) \frac{x-x_1}{1} + f^{(2)}(x_1) \frac{(x-x_1)^2}{2!} + \dots + f^{(n)}(x_1) \frac{(x-x_1)^n}{n!},$$

die ersichtlich macht, daß eine ganze Function n^{ten} Grades auch vollkommen bestimmt ist, sobald man ihren Werth und den ihrer n Ableitungen $f^{(n)}(x)$ an einer Stelle x_1 kennt.

Beachtet man, daß eine ganze Function n^{ten} Grades ohne ein von x freies Glied

$$g(x) = \alpha_{n-1}x + \alpha_{n-2}x^2 + \dots + \alpha_0x^n$$

in der Umgebung der Stelle $x=0$ stetig veränderlich ist, indem nach Fixirung einer positiven Gröfse α , die größer ist als jeder der absoluten Beträge $|\alpha_v|$,

$$|g(x)| < \alpha|x| \frac{1-|x|^{n+1}}{1-|x|}$$

wird und nun nach Annahme einer beliebigen kleinen positiven Gröfse δ eine Gröfse ρ so bestimmt werden kann, daß für jede Stelle der durch die Bedingung $|x| < \rho$ definirten Umgebung von Null,

$$\alpha \cdot |x| \cdot \frac{1-|x|^{n+1}}{1-|x|} < \delta,$$

so erhellt leicht, daß eine beliebige ganze Function $f(x)$ in der Umgebung jeder endlichen Stelle x_1 stetig ist.

Man kann nämlich nach Angabe einer Gröfse δ eine Umgebung ρ dieser Stelle so finden, daß der absolute Betrag

$$|f(x) - f(x_1)| = \left| f^{(1)}(x_1) \frac{x-x_1}{1} + f^{(2)}(x_1) \frac{(x-x_1)^2}{2!} + \dots + f^{(n)}(x_1) \frac{(x-x_1)^n}{n!} \right|$$

für jede Stelle x dieser Umgebung kleiner wird als δ . Dazu ist nur nothwendig, daß man eine positive Gröfse α angeben kann, die größer ist als jeder der absoluten Beträge $|f^{(n)}(x_1)|$, und das wird wieder möglich sein, wenn keiner der Coefficienten α_v von $f(x)$ und $|x_1|$ nicht unendlich ist.

Darnach ist die ganze Function (mit endlichen Coefficienten) an jeder Stelle des endlichen Bereiches der Variablen und auch in dem ganzen endlichen Bereiche stetig.

Wenn damit auch festgestellt ist, daß die ganze Function in hinreichend kleiner Umgebung einer Stelle x_1 nur Werthe annimmt, deren paarweis gebildete Differenz dem absoluten Betrage nach beliebig klein ist, so wissen wir noch nicht, ob die Function continuirlich ist, d. h.

es ist noch nicht nachgewiesen, daß $y = f(x)$ jeden Werth, der in der nächsten Umgebung einer Stelle $y_1 = f(x_1)$ liegt, bei unendlich kleinen Änderungen der Variablen annimmt. —

Um der Frage nach der Continuität näher zu kommen, wollen wir uns vorerst über die Frage nach den Nullstellen der ganzen Function orientiren und stellen zunächst die folgenden Betrachtungen an: Es bestehen die Sätze:*)

1) Für den absoluten Betrag $|x| = \xi$ kann man einen Werth r so angeben, daß für alle der Bedingung $|x| \geq r$ genügenden Werthe der Variablen der absolute Betrag einer ganzen Function $f(x)$ größer wird als eine vorgegebene GröÙe g . Es sei

$$\begin{aligned} f(x) &= a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_n \\ &= a_0 x^n \left(1 + \frac{a_1}{a_0} \frac{1}{x} + \frac{a_2}{a_0} \frac{1}{x^2} + \dots + \frac{a_n}{a_0} \frac{1}{x^n} \right), \end{aligned}$$

dann wird

$$|f(x)| \leq |a_0 x^n| \cdot \left| 1 + \frac{a_1}{a_0} \frac{1}{x} + \dots + \frac{a_n}{a_0} \frac{1}{x^n} \right|.$$

Bezeichnet man den größten Werth unter den absoluten Beträgen $\left| \frac{a_n}{a_0} \right|$ mit α , so liegt der absolute Betrag von $f(x)$ für diejenigen x Werthe, deren Betrag $|x| = \xi$ ist, wegen der Ungleichung

$$\alpha \left(\frac{1}{\xi} + \frac{1}{\xi^2} + \dots + \frac{1}{\xi^n} \right) < \frac{1}{\xi} \frac{\alpha}{1 - \frac{1}{\xi}} = \frac{\alpha}{\xi - 1}$$

zwischen den GröÙen:

$$|a_0| \xi^n \left(1 - \frac{\alpha}{\xi - 1} \right) \quad \text{und} \quad |a_0| \xi^n \left(1 + \frac{\alpha}{\xi - 1} \right).$$

Macht man hierauf $\frac{\alpha}{\xi - 1}$ dadurch kleiner oder gleich der beliebig kleinen positiven GröÙe δ , daß man

$$|x| = \xi > \frac{\alpha + \delta}{\delta}$$

setzt, so liegt der besagte absolute Betrag von $f(x)$ zwischen den Werthen

$$|a_0| \xi^n (1 - \delta) \quad \text{und} \quad |a_0| \xi^n (1 + \delta).$$

Wählt man schließlicb $|x| = r$ noch der Bedingung

$$|a_0| r^n (1 - \delta) > g$$

entsprechend, so wird $|f(x)|$ für alle x , deren Betrag $|x| \geq r$ ist, auch größer als g .

2) Für ein x , dessen absoluter Betrag größer ist als jede angebare GröÙe, wird ferner $|f(x)|$ wegen der Ungleichung

$$|f(x)| > |a_0| |x|^n (1 - \delta)$$

unendlich groß.

*) Vergl. Serret, Höhere Algebra Bd. 1.

3) Es leuchtet auch ein, daß man der Variablen x stets Werthe geben kann, für die der absolute Betrag desjenigen Gliedes der ganzen Function, welches die höchste Potenz von x enthält, den absoluten Betrag der Summe der übrigen Glieder übertrifft.

4) Ist andererseits eine an der Stelle $x=0$ verschwindende ganze Function gegeben

$$\begin{aligned} g(x) &= a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_m x^m \\ &= a_m x^m \left(1 + \frac{a_{m-1}}{a_m} x + \dots + \frac{a_0}{a_m} x^{n-m} \right), \end{aligned}$$

so kann man solche Variabelnwerthe x finden, daß der absolute Betrag des Gliedes $a_m x^m$ mit der niedrigsten Potenz größer wird als der absolute Betrag der Summe der übrigen Glieder.

Bezeichnet nämlich α den größten unter den Werthen $\left| \frac{a_\mu}{a_m} \right|$, so ist für jeden Werth $|x| < 1$

$$\left| \frac{a_{m-1} x}{a_m} \right| + \left| \frac{a_{m-2} x^2}{a_m} \right| + \dots + \left| \frac{a_0 x^{n-m}}{a_m} \right| \leq \frac{\alpha |x|}{1 - |x|}.$$

Bedeutet dann δ eine beliebig kleine Größe und wählt man

$$|x| < \frac{\delta}{\alpha + \delta},$$

so wird

$$\frac{\alpha |x|}{1 - |x|} < \delta,$$

und nun liegt $|g(x)|$ zwischen den Werthen

$$|a_m x^m| (1 - \delta) \quad \text{und} \quad |a_m x^m| (1 + \delta),$$

woraus die genannte Behauptung hervorgeht.

5) Dem ersten Satze steht der folgende gegenüber: Ist $f(x)$ eine ganze Function, deren absoluter Betrag nicht verschwindet, wenn man x den bestimmten Werth x_1 beilegt, so kann man in beliebig kleiner Umgebung von x_1 Stellen $x = x_1 + h$ ermitteln, so daß

$$|f(x_1 + h)| < |f(x_1)|. *$$

Es war

$$f(x_1 + h) = f(x_1) + f'(x_1) \frac{h}{1} + \dots + f^{(n)}(x_1) \frac{h^n}{n!},$$

doch der Allgemeinheit wegen setzen wir fest, daß einige der Ableitungen von $f(x)$ und zwar die ersten $\nu - 1$ verschwinden, dann ist

$$f(x_1 + h) = f(x_1) + f^{(\nu)}(x_1) \frac{h^\nu}{\nu!} + \dots + f^{(n)}(x_1) \frac{h^n}{n!}$$

und hierin $f(x_1)$ von Null verschieden, da $|f(x)|$ nicht verschwinden sollte, wenn $x = x_1$ gesetzt wird.

*) Serret l. c. § 43.

Bezeichnet man die endlichen Gröfsen:

$$\frac{1}{\mu!} \frac{f^{(\mu)}(x_1)}{f(x_1)} \quad \text{mit} \quad C_\mu = \alpha_\mu + i\beta_\mu \quad (\mu = \nu, \nu + 1, \dots, n),$$

so entsteht die Formel

$$\frac{f(x_1 + h)}{f(x_1)} = 1 + (\alpha_\nu + i\beta_\nu) h^\nu + \dots + (\alpha_n + i\beta_n) h^n$$

und daneben ist:

$$\left| \frac{f(x_1 + h)}{f(x_1)} \right| = |1 + (\alpha_\nu + i\beta_\nu) h^\nu + \dots + (\alpha_n + i\beta_n) h^n|.$$

Es fragt sich nur, ob man h so wählen kann, daß die rechte Seite kleiner als 1 wird. In dem Falle eines negativen α_ν kann man gewiß einen positiven reellen Werth von h finden, so daß in

$$\left| \frac{f(x_1 + h)}{f(x_1)} \right| = \sqrt{(1 + \alpha_\nu h^\nu + \dots + \alpha_n h^n)^2 + (\beta_\nu h^\nu + \dots + \beta_n h^n)^2}$$

der absolute Betrag des negativen Gliedes $2\alpha_\nu h^\nu$ den der Summe aller übrigen unter dem Wurzelzeichen stehenden Glieder, welche h Potenzen enthalten, übertrifft, und dann wird in der That

$$|f(x_1 + h)| < |f(x_1)|.$$

In den Fällen

$$\alpha_\nu > 0; \quad \alpha_\nu = 0, \beta_\nu > 0; \quad \alpha_\nu = 0, \beta_\nu < 0,$$

läßt sich der aufgestellte Satz beweisen, wenn man der Reihe nach Gröfsen h von beliebig kleinem absoluten Betrage finden kann, für die h^ν reell und negativ, oder h^ν rein imaginär und positiv respective negativ ausfällt, denn dann sind wir auf den schon behandelten Fall zurückgeführt. *)

Versteht man unter Θ eine positive reelle Gröfse und setzt

$$h = \Theta k,$$

so muß man nunmehr fragen, ob man Gröfsen k angeben kann, für welche

$$k^\nu = -1 \quad \text{oder} \quad k^\nu = i \quad \text{oder} \quad k^\nu = -i$$

ist. Ist ν zunächst eine ungerade Zahl $2\mu + 1$, so sind

$$-1, \quad (-1)^\mu i, \quad (-1)^\mu (-i)$$

Zahlengröfsen der verlangten Art; ist aber ν eine gerade Zahl $2^\pi(2\mu + 1)$, so suche man in den Gleichungen

$$(k^{2^\pi})^{2\mu+1} = -1, i, -i$$

erst Werthe für k^{2^π} , deren $(2\mu + 1)^{\text{te}}$ Potenz gleich $-1, i, -i$ sind. Solche Werthe a haben wir eben angegeben, und es handelt sich nur mehr um eine π -malige Wiederholung der Aufgabe, aus einer Gröfse a die zweite Wurzel zu ziehen, denn ist

*) Diesen Vorgang benützt Weierstrass in seinen Vorlesungen.

$k^{2x} = a$, so wird $k^{2x-1} = \sqrt{a}$, $k^{2x-3} = \sqrt{\sqrt{a}}$ usw.

Die Bestimmung einer Gröfse $p + iq$, deren zweite Potenz gleich $a = \alpha + i\beta$ ist, macht aber keine Schwierigkeit, denn die Gleichung

$$\alpha + i\beta = (p + iq)^2$$

erfordert nur die Ermittlung zweier reeller Gröfsen p und q aus den Gleichungen

$$p^2 - q^2 = \alpha, \quad 2pq = \beta$$

oder den Gleichungen:

$$p^4 - \alpha p^2 - \left(\frac{\beta}{2}\right)^2 = 0, \quad q^4 + \alpha q^2 - \left(\frac{\beta}{2}\right)^2 = 0.$$

Es wird somit:

$$p = \pm \sqrt{\frac{\alpha}{2} + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 + \left(\frac{\beta}{2}\right)^2}}, \quad q = \mp \sqrt{-\frac{\alpha}{2} + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 + \left(\frac{\beta}{2}\right)^2}}$$

und wir erkennen, daß die speciellen Gleichungen $k^r = -1, i, -i$ stets Wurzeln besitzen.

Jetzt aber lassen sich in allen möglichen Fällen Werthe $(x_1 + h)$ finden, für die

$$|f(x_1 + h)| < |f(x_1)|,$$

und offenbar auch Werthe in beliebig kleiner Umgebung von x_1 , denn man kann die Gröfse h beliebig klein wählen.

Nach dem ersten Satze wird der absolute Betrag einer ganzen Function $f(x)$ für alle einer Bedingung $|x| \geq r$ genügenden Werthe größer als eine vorgegebene Gröfse g , und nach dem letzten Theorem kann man von jeder die Umgebung r der Stelle $x = 0$ begrenzenden Stelle derart in das Innere dieses Bereiches fortschreiten, daß $|f(x)|$ immer kleiner und kleiner wird. Der absolute Betrag $|f(x)|$ kann nicht unter den Werth Null herabsinken, kann aber der Null beliebig nahe kommen. Wenn $|f(x)|$ die untere Grenze erreicht, dann besitzt die ganze Function $f(x)$ eine Nullstelle und die Gleichung $f(x) = 0$ hat eine Wurzel.

Könnten wir nun zeigen, daß

$$|f(x)| = |f(\xi + i\eta)| = |\varphi(\xi, \eta) + i\psi(\xi, \eta)|$$

eine von den reellen Variablen ξ und η abhängige stetig veränderliche Gröfse ist, oder könnten wir die Stetigkeit einer durch die Gleichung

$$z^2 - (\varphi^2(\xi, \eta) + \psi^2(\xi, \eta)) = 0$$

definiten Gröfse z beweisen, dann müßte $|f(x)|$ innerhalb des durch die Bedingung $|x| < r$ definiten Bereiches die untere Grenze Null für ein Werthepaar (ξ, η) erreichen, und jede ganze Function hat dann eine Nullstelle.

Wir kommen also auf ein neues Problem, dessen Erledigung wir besser verschieben, weil wir später die Existenz der Nullstelle und die

Continuität der ganzen Function sehr einfach erkennen werden. Es mag hier nur noch hervorgehoben werden, daß man zum Beweise der Existenz der Wurzel einer algebraischen Gleichung $f(x) = 0$ auch schon an dieser Stelle nach einem Verfahren forschen könnte, durch welches man eine Werthereihe

$$\xi^{(v)} + i\eta^{(v)} \quad (v = 1, 2, 3 \dots)$$

mit der Grenzstelle $x' = \xi' + i\eta'$ so bestimmt, daß die zugehörigen Functionswerthe mit den absoluten Beträgen:

$$|f(\xi^{(v)} + i\eta^{(v)})| = \sqrt{\varphi^2(\xi^{(v)}, \eta^{(v)}) + \psi^2(\xi^{(v)}, \eta^{(v)})}$$

eine Elementarreihe constituiren, denn dann würde dem Grenzwerte $\xi' + i\eta'$ ein Werth

$$\sqrt{\varphi^2(\xi', \eta') + \psi^2(\xi', \eta')} = 0$$

zugehören und weil hierin $\varphi(\xi', \eta')$ und $\psi(\xi', \eta')$ einzeln verschwinden müßten, wäre auch

$$f(\xi' + i\eta') = \varphi(\xi', \eta') + i\psi(\xi', \eta') = 0,$$

und das Verfahren hätte eine Wurzel $x' = \xi' + i\eta'$ geliefert. *)

§ 19. Größter gemeinsamer Theiler zweier ganzer Functionen einer Variablen.

Nachdem wir in der Zerlegung ganzer Zahlen und ganzer Functionen eine auffallende Übereinstimmung gefunden haben, liegt es nahe, die Verwandtschaft der Theorie der ganzen Functionen mit der der ganzen Zahlen näher zu verfolgen und vor Allem die Bestimmung des größten gemeinsamen Theilers zweier Functionen vom n^{ten} und m^{ten} Grade vorzunehmen, d. h. denjenigen algebraischen Theiler zweier Functionen zu suchen, welcher den höchsten Grad besitzt.

Lassen die gegebenen Functionen $f(x)$ und $g(x)$ die Darstellungen zu:

$$f(x) = a_0 (x - x_1)^{n_1} (x - x_2)^{n_2} \dots (x - x_\mu)^{n_\mu}$$

$$g(x) = b_0 (x - x'_1)^{m_1} (x - x'_2)^{m_2} \dots (x - x'_m)^{m_m},$$

wo $\sum_{\mu=1}^{\mu} n_\mu = n$ und $\sum_{m=1}^m m_m = m$ ist, und sind etwa $x_\alpha, x_\beta \dots x_\pi$ gemeinsame Nullstellen und $\nu_\alpha, \nu_\beta, \dots \nu_\pi$ die kleineren der zugehörigen Exponenten $n_\alpha, n_\beta, \dots n_\pi$ resp. $m_\alpha, m_\beta, \dots m_\pi$, so ist offenbar

$$(x - x_\alpha)^{\nu_\alpha} (x - x_\beta)^{\nu_\beta} \dots (x - x_\pi)^{\nu_\pi}$$

der größte gemeinsame Theiler von $f(x)$ und $g(x)$.

*) Man sehe Lipschitz' Verfahren in seinem Lehrbuche der Analysis nach. Dort sind allerdings die trigonometrischen Functionen benützt, denen wir hier bei der Reproduction des Cauchy'schen Beweises ausgewichen sind.

Es ist leicht, eine *nothwendige und hinreichende Bedingung* für die *Existenz einer gemeinsamen Nullstelle zweier Functionen*:

$$f(x) = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_n$$

$$g(x) = b_0 x^m + b_1 x^{m-1} + \dots + b_m$$

aufzustellen.

Es seien x_1, x_2, \dots, x_n die Wurzeln der Gleichung $f(x) = 0$, dann sind durch diese x Werthe die folgenden m Gleichungen

$$f(x) = 0, \quad x f(x) = 0, \dots, x^{m-1} f(x) = 0$$

gleichzeitig erfüllt und offenbar auch die n Gleichungen

$$g(x) - y = 0, \quad x g(x) - x y = 0, \dots, x^{n-1} g(x) - x^{n-1} y = 0,$$

wenn hierin x und y der Reihe nach die Werthe x_1, x_2, \dots, x_n resp. $g(x_1), g(x_2), \dots, g(x_n)$ erhalten.

Fasst man die $(m+n)$ genannten Gleichungen als linear in den $(m+n)$ Potenzen $x^0, x^1, \dots, x^{m+n-1}$ auf, so wird die Determinante dieses Gleichungssystems

a_0	a_1	\dots	a_{m-1}	a_m	a_{m+1}	\dots	a_{n-1}	a_n	0	\dots	0
0	a_0	\dots	a_{m-2}	a_{m-1}	a_m	\dots	a_{n-2}	a_{n-1}	a_n	\dots	0
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
0	0	\dots	a_0	a_1	a_2	\dots	a_{n-m}	a_{n-m+1}	a_{n-m+2}	\dots	a_n
b_0	b_1	\dots	b_{m-1}	$b_m - y$	0	\dots	0	0	0	\dots	0
0	b_0	\dots	b_{m-2}	b_{m-1}	$b_m - y$	\dots	0	0	0	\dots	0
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
0	0	\dots	0	0	0	\dots	b_0	b_1	b_2	\dots	$b_m - y$

jedesmal Null, wenn man y einen der angegebenen Werthe ertheilt.

Die Determinante selbst ist eine ganze Function n^{ten} Grades von y mit den Nullstellen $y_\nu = g(x_\nu)$ ($\nu = 1, 2, \dots, n$). Denken wir die Determinante $\Phi(y)$ nach Potenzen von y geordnet, so ist das letzte von y freie Glied gleich dem Producte von

$$(-1)^n \cdot g(x_1) g(x_2) \dots g(x_n)$$

und dem Coefficienten von y^n d. i. $(-1)^n a_0^m$. Dasselbe Product kann man auch gewinnen, indem man in der Determinante y Null setzt, wobei eine neue Determinante R entsteht. Aus der Beziehung

$$a_0^m g(x_1) g(x_2) \dots g(x_n) = R$$

schliesst man aber, dass die Determinante R verschwinden muss, wenn die ganze Function $g(x)$ für eine Nullstelle von $f(x)$ Null werden soll.

Ist umgekehrt $R = 0$, so besitzen die Gleichungen $f(x) = 0$ und $g(x) = 0$ eine gemeinsame Wurzel, denn R ist die Determinante der $(m+n)$ Gleichungen

$$f = 0, \quad x f = 0, \dots, x^{m-1} f = 0$$

$$g = 0, \quad x g = 0, \dots, x^{n-1} g = 0$$

$$b_0^{n-m}, \quad b_0^{n-m-1}, \quad \dots \quad b_0^1, \quad b_0^0$$

und addirt dann alle, so folgt:

$$b_0^{n-m+1} f_n - (a_0 b_0^{n-m} x^{n-m} + c_0^{(1)} b_0^{n-m-1} x^{n-m-1} + \dots + c_0^{(n-m)}) g_m = q_{m-1}$$

oder wenn man die Klammergröfse mit p_{n-m} bezeichnet, die oben angeschriebene Gleichung.

Soll f_n durch g_m theilbar sein, so mufs q_{m-1} identisch verschwinden, und das tritt ein, wenn die aus den Coefficienten von f_n und g_m durch die ersten drei Rechnungsoperationen zusammengesetzten m ganzen Ausdrücke

$$c_0^{(n-m+1)}, \quad c_1^{(n-m+1)}, \quad \dots \quad c_{m-1}^{(n-m+1)}$$

alle Null sind.

Es kann nicht mehr als ein Paar Functionen p und q der verlangten Art geben. Denn wäre sowohl

$$b_0^{n-m+1} f_n = g_m p_{n-m} + q_{m-1},$$

als auch

$$b_0^{n-m+1} f_n = g_m P_{n-m} + Q_{m-1},$$

so müfste

$$g_m (P_{n-m} - p_{n-m}) + (Q_{m-1} - q_{m-1}) = 0$$

sein und diese Identität erfordert, dafs die ganze Function $(m-1)^{\text{ten}}$ Grades $Q_{m-1} - q_{m-1}$ einen Theiler m^{ten} Grades g_m besitze. Das geht nicht an, folglich mufs

$$Q_{m-1} \equiv q_{m-1}$$

sein. Weil nunmehr $g_m (P_{n-m} - p_{n-m})$ für jeden Werth der Variabeln verschwinden soll, schliessen wir auch auf das identische Verschwinden von $P_{n-m} - p_{n-m}$ oder die identische Übereinstimmung von P_{n-m} und p_{n-m} , und damit ist der Beweis geliefert.

Sollte in der früheren Folge von Gleichungen q_{m-1} nicht identisch verschwinden, so bilde man neben

$$b_0^{n-m+1} f_n = g_m p_{n-m} + q_{m-1},$$

oder wie wir bequemer schreiben:

$$f_n = g_m p_{n-m} + q_{m-1},$$

indem wir den Factor b_0^{n-m+1} in p_{n-m} und q_{m-1} aufnehmen, die Gleichungen.

$$g_m = q_{m-1} p_1^{(1)} + q_{m-2},$$

$$q_{m-1} = q_{m-2} p_1^{(2)} + q_{m-3},$$

$$\dots \dots \dots$$

$$q_{\mu+1} = q_{\mu} p_1^{(m-\mu)} + q_{\mu-1},$$

$$q_{\mu} = q_{\mu-1} p_1^{(m-\mu+1)},$$

wo für die neu eintretenden Functionen q stets der größtmögliche Grad angenommen ist. Das nicht weiter zu erläuternde Verfahren führt nothwendig auf einen gemeinsamen Theiler $q_{\mu-1}$ von f_n und g_m ,

der für $\mu = 1$ in eine Constante übergeht; und zwar ist $q_{\mu-1}$ der größte gemeinsame Theiler der gegebenen Functionen, weil jeder Theiler von f_n und g_m in $q_{\mu-1}$ enthalten sein muß.

Ist $q_{\mu-1}$ eine Constante, so nennt man f und g_m Functionen ohne gemeinsamen Theiler und deren Resultante R ist von Null verschieden.

Wenn umgekehrt f_n und g_m keinen gemeinsamen Theiler besitzen, ist $q_{\mu-1}$ eine Constante und dann läßt sich der Quotient von f_n und g_m in der Form eines Kettenbruches anschreiben *):

$$\frac{f_n}{g_m} = p_{n-m} + \frac{1}{p_1^{(1)}} + \frac{1}{p_1^{(2)}} + \dots + \frac{1}{p_1^{(m-1)}} + \frac{1}{p_1^{(m)}}.$$

Bildet man die Brüche, welche durch Vereinigung von p_{n-m} und den ersten ν Gliedern der Kette entstehen, d. h.

$$\frac{Z_0(x)}{N_0(x)} = \frac{p_{n-m}}{1}; \quad \frac{Z_1(x)}{N_1(x)} = p_{n-m} + \frac{1}{p_1^{(1)}} = \frac{p_1^{(1)} p_{n-m} + 1}{p_1^{(1)}},$$

$$\frac{Z_2(x)}{N_2(x)} = p_{n-m} + \frac{1}{p_1^{(1)}} + \frac{1}{p_1^{(2)}} = \frac{p_1^{(2)} Z_1 + Z_0}{p_1^{(2)} N_1 + N_2}$$

usw. und durch den Schluß von $\nu - 1$ auf ν :

$$\frac{Z_\nu(x)}{N_\nu(x)} = p_{n-m} + \frac{1}{p_1^{(1)}} + \frac{1}{p_1^{(2)}} + \dots + \frac{1}{p_1^{(\nu)}} = \frac{p_1^{(\nu)} Z_{\nu-1} + Z_{\nu-2}}{p_1^{(\nu)} N_{\nu-1} + N_{\nu-2}} \quad **)$$

und endlich $\frac{Z_m(x)}{N_m(x)} = \frac{f_n}{g_m}$, so erfüllen zwei aufeinander folgende Brüche die durch denselben Schluß leicht zu verificirnde Beziehung:

$$Z_{\nu-1} N_\nu - Z_\nu N_{\nu-1} = (-1)^\nu$$

und speciell ist

$$(-1)^m (Z_{m-1} g_m - N_{m-1} f_n) = 1.$$

Setzt man

$$(-1)^{m+1} N_{m+1} = \psi_{m-1}, \quad (-1)^m Z_{m-1} = \varphi_{m-1},$$

wo die Indices offenbar gerade wieder die Gradzahlen dieser Functionen anzeigen, so wird

$$\varphi_{m-1} g_m + \psi_{m-1} f_n = 1.$$

1) Wenn also f_n und g_m keinen gemeinsamen Theiler besitzen, so gibt es stets zwei bestimmte ganze Functionen des $(n-1)^{\text{ten}}$ und $(m-1)^{\text{ten}}$ Grades φ_{n-1} und ψ_{m-1} , welche die Gleichung:

$$\varphi_{n-1} g_m + \psi_{m-1} f_n = 1 \quad (\alpha)$$

identisch erfüllen.

*) Vergleiche Lipschitz l. c.

**) Ich schreibe ausführlich $\frac{p_1^{(\nu)} Z_{\nu-1} + Z_{\nu-2}}{p_1^{(\nu)} N_{\nu-1} + N_{\nu-2}}$.

2) Dann aber gibt es auch zwei ganze Functionen Φ_{n+k-1} und Ψ_{m+k-1} , welche der Gleichung:

$$\Phi_{n+k-1} g_m + \Psi_{m+k-1} f_n = \Theta_k$$

genügen, denn dazu hat man in der mit Θ_k multiplicirten Gleichung (α) nur

$$\varphi_{n-1} \Theta_k = \Phi_{n+k-1}, \quad \psi_{m-1} \Theta_k = \Psi_{m+k-1}$$

zu setzen.

Bildet man hingegen

$$\varphi_{n-1}(g_m \Theta_k) + \psi_{m-1}(f_n \Theta_k) = \Theta_k$$

und bezeichnet $g_m \Theta_k$ und $f_n \Theta_k$ mit G_{m+k} und F_{n+k} , so sind diese Functionen mit dem gemeinsamen Theiler Θ_k zwei Functionen φ_{n-1} und ψ_{m-1} derart zugeordnet, daß

$$\varphi_{n-1} G_{m+k} + \psi_{m-1} F_{n+k} = \Theta_k$$

wird.

3) Daraus schließt man, daß man in dem Falle, wo g_m und f_n einen gemeinsamen Theiler k^{ten} Grades Θ_k besitzen, zwei ganze Functionen φ_{n-k-1} und ψ_{m-k-1} bestimmen kann, welche die Gleichung:

$$\varphi_{n-k-1} g_m + \psi_{m-k-1} f_n = \Theta_k$$

erfüllen; für zwei derartige Functionen existirt aber auch eine Gleichung

$$\varphi_{n-k} g_m + \psi_{m-k} f_n = 0,$$

denn es muß ja einmal

$$f_n = \varphi_{n-k} \Theta_k, \quad g_m = -\psi_{m-k} \Theta_k$$

sein; niemals aber ist eine Gleichung der Gestalt

$$\varphi_{n-k-1} g_m + \psi_{m-k-1} f_n = \Theta_{k-x} \quad (x = 1, 2, \dots k)$$

möglich. In der That setzt man

$$\frac{g_m}{\Theta_k} = -\psi_{m-k}, \quad \frac{f_n}{\Theta_k} = \varphi_{n-k},$$

so existirt für diese Functionen ohne gemeinsamen Theiler eine und nur eine Gleichung der Form:

$$\varphi_{n-k-1} \psi_{m-k} + \psi_{m-k-1} \varphi_{n-k} = 1,$$

mit der die obige nicht vereinbar ist.

4) Besteht eine Gleichung:

$$\varphi_{n-k} g_m + \psi_{m-k} f_n = 0,$$

aber niemals eine Gleichung der Gestalt:

$$\varphi_{n-k-1} g_m + \psi_{m-k-1} f_n = 0,$$

so haben f_n und g_m einen größten gemeinsamen Theiler k^{ten} Grades.

Setzen wir voraus, daß

$$f_n = \varphi_{n-k} \Theta_k + \varphi'_{n-k-1}$$

$$g_m = -\psi_{m-k} \Theta_k - \psi'_{m-k-1}$$

wäre, so ergäbe sich nach Multiplication dieser Gleichungen mit ψ_{m-k} resp. φ_{n-k} und dann folgender Addition die Beziehung:

$$\varphi'_{n-k-1} \psi_{m-k} - \psi'_{m-k-1} \varphi_{n-k} = 0,$$

doch darum würde die Summe:

$$\varphi'_{n-k-1} g_m + \psi'_{m-k-1} f_n = 0.$$

Eine solche Gleichung sollte aber nicht existiren, folglich ist die Annahme unrichtig und f_n und g_m besitzen den Theiler Θ_k , aber gewiß keinen Theiler höheren Grades, denn dann müßte eine Gleichung der ausgeschlossenen Art bestehen.

Das analytische Äquivalent dafür, daß $f(x)$ den Theiler g_n besitzt, lag in dem Verschwinden von m ganzen Ausdrücken $\alpha^{(n-m+1)}$ in den Coefficienten von f_n und g_m . Ebenso müssen k ganze Functionen dieser Coefficienten verschwinden, wenn f_n und g_m einen gemeinsamen Theiler k^{ten} Grades haben sollen, denn damit in der Folge von Gleichungen auf S. 101 $q_{\mu-1}$ vom Grade k wird, muß diese Folge mit der Gleichung

$$q_{k+1} = q_k p_1^{(m-k+1)} + q_{k-1}$$

abbrechen und hierin die ganze Function $(k-1)^{\text{ten}}$ Grades q_{k-1} mit k Coefficienten identisch Null sein. *)

Mit Hilfe der hier abgeleiteten Sätze lassen sich die für die ganzen Zahlen aufgestellten Theoreme über die Theilbarkeit auf die ganzen Functionen übertragen.

- 1) Sind f_n und g_m ganze Functionen ohne gemeinsamen Theiler und ist k eine beliebige dritte Function, so ist jeder gemeinsame Theiler von $f_n k$ und g_m auch Theiler von k .

Es ist nämlich

$$g_m \varphi_{n-1} + f_n \psi_{m-1} = 1$$

$$g_m \varphi_{n-1} k + f_n k \cdot \psi_{m-1} = k$$

und jeder Theiler von $f_n k$ und g_m ist Theiler der links stehenden Summe, er muß daher auch in k allein vorkommen.

- 2) Das Product zweier Functionen f_n und k , von denen keine durch g_m theilbar ist, kann kein Vielfaches von g_m sein.
- 3) Sind f_n und g_m Functionen ohne gemeinsamen Theiler, ist aber g_m ein Theiler von $f_n k$, so muß k durch g_m theilbar sein.
- 4) Besitzen f_n und g_m keinen gemeinsamen Theiler, so ist jedes gemeinsame Vielfache dieser Functionen von der Form $f_n g_m k$, ist aber $f_n = \varphi \Theta$, $g_m = \psi \Theta$ und haben φ und ψ keinen Theiler gemein, so erhält jedes Vielfache von f_n und g_m die Gestalt $\varphi \psi \Theta k$, und $\varphi \psi \Theta$ ist das kleinste gemeinschaftliche Vielfache. Die Vielfachen von f_n und g_m besitzen nämlich die Gestalt $f_n p$

*) Weierstraßs l. c. S. 121.

und $g_m q$, und wenn hier $f_n p$ durch g_m , $g_m q$ durch f_n theilbar sein soll, muß nach dem ersten Satze $p = g_m k_1$, $q = f_n k_2$ sein und das gemeinsame Vielfache von f_n und g_m erhält die Gestalt $f_n g_m k$.

Damit ferner die Vielfachen von $\varphi \odot$ und $\psi \odot$ z. B. $\varphi \odot p$ und $\psi \odot q$ durch einander theilbar sind, muß wieder $p = \varphi k_1$, $q = \varphi k_2$ werden, und das gemeinsame Vielfache nimmt die Form $\varphi \psi \odot k$ an. —

Ein weiteres Resultat dieser Untersuchungen besteht darin, daß wir, ohne den Existenzbeweis der Nullstellen einer ganzen Function und den Beweis für die Darstellung jeder Function $f(x)$ durch ein Product von Primfactoren erbracht zu haben, Zähler und Nenner eines Quotienten ganzer Functionen $\frac{f}{g}$ stets von den gemeinsamen Primfactoren und Theilern befreien können. Der Quotient von $f_n = \varphi \odot$ und $g_m = \psi \odot$ hat überall dort, wo \odot von Null verschieden ist, den Werth, welchen der Quotient $\frac{\varphi}{\psi}$ angibt. Ist \odot an einer Stelle x_1 Null, so setzt man als Werth des Quotienten

$$F(x) = \frac{f(x)}{g(x)},$$

für $x = x_1$, ebenfalls den Werth $\frac{\varphi(x_1)}{\psi(x_1)}$, wenngleich man aus der Relation

$$f\psi - g\varphi = 0$$

diesen Schluß nicht ziehen kann, weil f und g Null sind. Doch diese Festsetzung ist darin begründet, daß der Quotient $F(x)$ nach einem bestimmten Werthe und zwar nach $\frac{\varphi(x_1)}{\psi(x_1)}$ convergirt, wenn man x nach der Nullstelle von $\odot(x)$ führt.

§ 21. Ganze rationale Functionen mehrerer unabhängiger Variablen.

Es ist auch nothwendig, die ganzen Functionen mehrerer von einander unabhängiger Variablen x_1, x_2, \dots, x_n :

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = A_1 x_1^{m_1^{(1)}} x_2^{m_2^{(1)}} \dots x_n^{m_n^{(1)}} + A_2 x_1^{m_1^{(2)}} x_2^{m_2^{(2)}} \dots x_n^{m_n^{(2)}} + \dots \\ + A_n x_1^{m_1^{(n)}} x_2^{m_2^{(n)}} \dots x_n^{m_n^{(n)}}$$

zu betrachten.

Ordnet man diese Function nach fallenden Potenzen einer Variablen, z. B. x_1 , so entsteht ein Ausdruck

$$a_0 x_1^{n_1} + a_1 x_1^{n_1-1} + \dots + a_{n_1},$$

in welchem die Coefficienten a_0, a_1, \dots, a_{n_1} Functionen der übrigen $(n - 1)$ Variablen sind. Jede dieser Functionen denke man etwa nach x_2 geordnet:

$$a_\nu = a_{\nu,0} x_2^{n_2^{(\nu)}} + a_{\nu,1} x_2^{n_2^{(\nu)}-1} + \dots + a_{\nu,n_2^{(\nu)}} \quad (\nu = 0, 1, \dots, n_1),$$

und wiederum sind $a_{\nu, \mu}$ ganze Functionen von $x_3, x_4, \dots x_n$; so fahre man fort.

Wenn in $f(x_1, x_2 \dots x_n)$ x_1 in der n_1^{ten} , x_2 in der n_2^{ten} , x_n in der n_n^{ten} Potenz vorkommt und man gibt dann x_ν ($\nu = 1, 2 \dots n$) die $n_\nu + 1$ verschiedenen Werthe:

$$\xi_{\nu, 1}, \xi_{\nu, 2} \dots \xi_{\nu, n_\nu + 1}$$

und setzt voraus, daß f für jede Werthecombination

$$x_1 = \xi_{1, \alpha_1}, \quad x_2 = \xi_{2, \alpha_2}, \quad \dots \quad x_n = \xi_{n, \alpha_n}$$

verschwindet, wo α_ν irgend einen der Werthe $1, 2, \dots n_\nu + 1$ bezeichnet, so müssen sämtliche Constanten in $f(x_1, x_2 \dots x_n)$ Null sein, d. h. f verschwindet identisch, was für ein Werthesystem

$$x_1 = \xi, \quad x_2 = \xi_2, \quad \dots \quad x_n = \xi_n$$

man auch wählen mag.

Gibt man den Variablen $x_2, x_3, \dots x_n$ irgend feste der vorgelegten Werthe, so verschwindet die ganze Function f noch für $n_1 + 1$ Werthe von x_1 und das ist nur möglich, wenn sämtliche Constanten

$$a_0, a_1 \dots a_{n_1}$$

Null sind. Da man denselben Schluß ziehen muß, welche der Werthecombinationen für $x_2, x_3, \dots x_n$ auch verwendet werden, so müssen in jeder ganzen Function $a_0, a_1, \dots a_{n_1}$ von $x_2, x_3 \dots x_n$ alle Coefficienten verschwinden und dann ist f identisch Null.

Eine ganze Function $f(x_1, x_2, \dots x_n)$ vom n_ν^{ten} Grade in

$$x_\nu \quad (\nu = 1, 2 \dots n)$$

wird demnach für jedes Werthesystem $(x_1, x_2, \dots x_n)$ Null, wenn sie für die

$$(n_1 + 1) (n_2 + 1) \dots (n_n + 1)$$

Combinations aus $n_1 + 1$ Werthen für x_1 , $n_2 + 1$ Werthen für x_2 , und $n_n + 1$ Werthen für x_n verschwindet.

Wenn jede ganze Function einer Variablen Nullstellen hat, leuchtet ein, daß eine ganze Function mehrerer Variablen unendlich viele Nullstellen ($\xi_1, \xi_2, \dots \xi_n$) besitzen wird, doch unter diesen können nicht alle aus $n_\nu + 1$ Werthen für x_ν ($\nu = 1, 2 \dots n$) gewonnenen Combinationen vorkommen, sonst wäre die ganze Function an jeder Stelle Null.*)

Zwei ganze Functionen, von denen keine x_ν in höherem als dem

*) In jeder Umgebung einer Nullstelle der ganzen Function liegen schon unendlich viele andere Nullstellen, doch die Gesamtheit constituirte nur ein Continuum von $(2n - 2)$ -facher Ausdehnung, indem man $(n - 1)$ der Variablen $x_1, x_2, \dots x_n$ beliebige Werthe geben kann und die Werthe der n^{ten} nur in endlicher Anzahl vorhanden sein können, wenn die ganze Function nicht identisch Null werden soll. Andernfalls gäbe es nämlich eine Häufungsstelle (x), in deren Umgebungen unendlich viele Werthesysteme (x') liegen, für die die Function verschwindet.

n_v ten Grade enthält, werden nun offenbar in den Coefficienten gleichnamiger Glieder $x_1^{a_1} x_2^{a_2} \dots x_n^{a_n}$ übereinstimmen, wenn sie für alle Werthesysteme (x_1, x_2, \dots, x_n) , die man aus

$$x_\nu = \xi_{\nu, 1}, \xi_{\nu, 2}, \dots, \xi_{\nu, n_\nu + 1} \quad (\nu = 1, 2 \dots n)$$

zusammensetzen kann, dieselben Werthe annehmen.

Auf diesem Satze beruht die Verallgemeinerung der Lagrange'schen Formel, die wieder anzeigt, wie eine ganze Function

$$f(x_1, x_2 \dots x_n)$$

aus den Werthen zusammengesetzt ist, welche sie an

$$(n_1 + 1) (n_2 + 1) \dots (n_n + 1)$$

Stellen der in Rede stehenden Art annimmt.

Der arithmetische Bau der Formel für $f(x_1, x_2 \dots x_n)$ ist nicht schwer zu beurtheilen, wenn man nur die Lagrange'sche Formel wiederholt anwendet. Zunächst ist:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$= \sum_{a_1=1}^{n_1+1} f(\xi_{1, a_1}, x_2, \dots, x_n) \frac{(x_1 - \xi_{1, 1}) \dots (x_1 - \xi_{1, a_1-1}) (x_1 - \xi_{1, a_1+1}) \dots (x_1 - \xi_{1, n_1+1})}{(\xi_{1, a_1} - \xi_{1, 1}) \dots (\xi_{1, a_1} - \xi_{1, a_1-1}) (\xi_{1, a_1} - \xi_{1, a_1+1}) \dots (\xi_{1, a_1} - \xi_{1, n_1+1})}$$

und diese Formel gibt für jedes Werthesystem $(x_1 = \xi_{1, a_1}, x_2, \dots, x_n)$ die verlangte Identität. Zerlegt man hierauf:

$$f(\xi_{1, a_1}, x_2, \dots, x_n) = \xi_{1, a_1}^{n_1} f_0^{(a_1)}(x_2, x_3 \dots x_n) + \xi_{1, a_1}^{n_1-1} f_1^{(a_1)}(x_2, x_3 \dots x_n) + \dots + f_{n_1}^{(a_1)}(x_2, x_3, \dots, x_n)$$

und wendet die Lagrange'sche Formel auf die ganzen Functionen $f^{(a_1)}$ von $(n-1)$ Variablen von Neuem an, so kann man schliesslich so verfügen, daß die $(n_1 + 1) (n_2 + 1) \dots (n_n + 1)$ Größen

$$f(\xi_{1, a_1}, \xi_{2, a_2}, \dots, \xi_n, a_n)$$

vorgeschriebene Werthe $\eta_{a_1, a_2 \dots a_n}$ annehmen. —

Entsprechend der Darstellung:

$$f(x+h) = f(x) + f^{(1)}(x) \frac{h}{1} + f^{(2)}(x) \frac{h^2}{2!} + \dots + f^{(n)}(x) \frac{h^n}{n!}$$

kann man auch $f(x_1 + h_1, x_2 + h_2, \dots, x_n + h_n)$ als Summe von Gliedern

$$h_1^{r_1} h_2^{r_2} \dots h_n^{r_n}$$

mit Coefficienten, die ganze Functionen von x_1, x_2, \dots, x_n sind, ausdrücken, man hat nur den binomischen Lehrsatz zur Entwicklung des einzelnen Gliedes

$$(x_1 + h_1)^{m_1} (x_2 + h_2)^{m_2} \dots (x_n + h_n)^{m_n}$$

anzuwenden. Man sieht, daß die Differenz

$$f(x_1 + h_1, x_2 + h_2, \dots, x_n + h_n) - f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

die Gestalt

$$f_1(x_1, x_2 \dots x_n)h_1 + f_2(x_1, x_2, \dots x_n)h_2 + \dots + f_n(x_1, x_2 \dots + x_n)h_n \\ + \sum_{v=1}^n h_v \varphi_v(x_1, x_2, \dots x_n; h_1, h_2, \dots h_n)$$

erhält, wo f_v und φ_v ganze Functionen ihrer Argumente sind und φ_v mit den n Größen h verschwinden.

Bezeichnet man die Ableitungen von f als ganze Function von x , allein betrachtet mit

$$f_{x_v}^{(1)}, f_{x_v}^{(2)}, \dots f_{x_v}^{(n_v)} \quad \text{oder} \quad \frac{\partial f}{\partial x_v}, \frac{\partial^2 f}{\partial x_v^2}, \dots \frac{\partial^{n_v} f}{\partial x_v^{n_v}}$$

und bildet man

$$f(x_1, x_2, \dots x_{v-1}, x_v + h_v, x_{v+1}, \dots x_n) \\ = f(x_1, x_2, \dots x_n) + \frac{\partial f}{\partial x_v} h_v + \frac{\partial^2 f}{\partial x_v^2} \frac{h_v^2}{2!} + \dots + \frac{\partial^{n_v} f}{\partial x_v^{n_v}} \frac{h_v^{n_v}}{n_v!},$$

so zeigt eine einfache Ueberlegung, daß

$$f_v(x_1, x_2, \dots x_n) = \frac{\partial f}{\partial x_v} \quad (v = 1, 2 \dots n)$$

sein muß. Man nennt diese ganze Function f_v die *erste Derivirte der Ableitung von f nach der Variablen x_v* .

Von dieser Function kann man Ableitungen nach anderen Variablen x_μ bilden. Bezeichnet man $\frac{\partial f_v}{\partial x_\mu}$ mit $\frac{\partial^2 f}{\partial x_\mu \partial x_v}$ und $\frac{\partial f_\mu}{\partial x_v}$ mit $\frac{\partial^2 f}{\partial x_v \partial x_\mu}$, so wird aber

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_\mu \partial x_v} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_v \partial x_\mu}.$$

Einnert man sich, wie der Ableitungsproceß definiert war, so ist klar, daß dieser Satz bewiesen sein wird, wenn er an dem einzelnen Gliede der ganzen Function f :

$$A_{m_1, m_2 \dots m_n} x_1^{m_1} x_2^{m_2} \dots x_n^{m_n} = \varphi(x_1, x_2 \dots x_n)$$

bestätigt werden kann. Es ist in der That:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_\mu \partial x_v} = \frac{\partial}{\partial x_\mu} (m_v A_{m_1, m_2 \dots m_n} x_1^{m_1} x_2^{m_2} \dots x_{v-1}^{m_{v-1}} x_v^{m_v-1} x_{v+1}^{m_{v+1}} \dots x_n^{m_n}) \\ = m_v m_\mu A_{m_1, m_2 \dots m_n} x_1^{m_1} x_2^{m_2} \dots x_v^{m_v-1} \dots x_\mu^{m_\mu-1} \dots x_n^{m_n} \\ = \frac{\partial}{\partial x_v} (m_\mu A_{m_1, m_2 \dots m_n} x_1^{m_1} x_2^{m_2} \dots x_\mu^{m_\mu} \dots x_v^{m_v-1} \dots x_n^{m_n}) \\ = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_v \partial x_\mu}, \text{ w. z. b. w.}$$

Dieser Satz ist dahin zu verallgemeinern, daß in

$$\frac{\partial^{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n} \varphi(x_1, x_2 \dots x_n)}{\partial x_1^{\mu_1} \partial x_2^{\mu_2} \dots \partial x_n^{\mu_n}}$$

das Resultat unabhängig ist von der Folge der Ableitungsprocesse. Nun fällt es nicht mehr schwer, das einzelne Glied:

$$A_{m_1, m_2, \dots, m_n} (x_1 + h_1)^{m_1} (x_2 + h_2)^{m_2} \dots (x_n + h_n)^{m_n} \\ = \varphi(x_1 + h_1, \dots, x_n + h_n)$$

aus $f(x_1 + h_1, x_2 + h_2, \dots, x_n + h_n)$ als Summe von Gliedern

$$h_1^{\mu_1} h_2^{\mu_2} \dots h_n^{\mu_n}$$

anzuschreiben, deren Coefficienten zusammengesetzte Ableitungen von $\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ sind. Das allgemeine Glied ist offenbar:

$$A_{m_1, m_2, \dots, m_n} \cdot h_1^{\mu_1} h_2^{\mu_2} \dots h_n^{\mu_n} x_1^{m_1 - \mu_1} x_2^{m_2 - \mu_2} \dots \\ \dots x_n^{m_n - \mu_n} \binom{m_1}{m_1 - \mu_1} \binom{m_2}{m_2 - \mu_2} \dots \binom{m_n}{m_n - \mu_n} \\ = A_{m_1, m_2, \dots, m_n} \prod_{v=1}^n h_v^{\mu_v} x_v^{m_v - \mu_v} (m_v) (m_v - 1) \dots (m_v - \mu_v + 1) \frac{1}{\mu_v!} \\ = \frac{\partial^{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n} \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1^{\mu_1} \partial x_2^{\mu_2} \dots \partial x_n^{\mu_n}} \frac{h_1^{\mu_1}}{\mu_1!} \frac{h_2^{\mu_2}}{\mu_2!} \dots \frac{h_n^{\mu_n}}{\mu_n!},$$

und darnach wird

$$f(x_1 + h_1, x_2 + h_2, \dots, x_n + h_n) \\ = \sum_{\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n = 0}^{n_1, n_2, \dots, n_n} \frac{\partial^{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n} f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1^{\nu_1} \partial x_2^{\nu_2} \dots \partial x_n^{\nu_n}} \frac{h_1^{\nu_1}}{\nu_1!} \frac{h_2^{\nu_2}}{\nu_2!} \dots \frac{h_n^{\nu_n}}{\nu_n!},$$

wo in der n -fachen Summe für $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$ alle Werthecombinations aus $\nu_1 = 0, 1, 2, \dots, n_1; \nu_2 = 0, 1, 2, \dots, n_2; \dots, \nu_n = 0, 1, 2, \dots, n_n$ zu setzen sind. Der Werth des allgemeinen Gliedes, in welchem $\nu_1 = \nu_2 = \dots = \nu_n = 0$ ist, ist $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Die Summe

$$\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n$$

kann nicht gröfser sein als die gröfste der Summen der Exponenten in den einzelnen Gliedern $\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Setzt man in der letzten Formel für x_n a_n und für

$$h_n (x_v - a_v) \quad (\nu = 1, 2, \dots, n),$$

so erhält man für die ganze Function f die Darstellung:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ = \sum_{\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n} \left(\frac{\partial^{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n} f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1^{\nu_1} \partial x_2^{\nu_2} \dots \partial x_n^{\nu_n}} \right)_{x_1 = a_1, x_2 = a_2, \dots, x_n = a_n} \frac{(x_1 - a_1)^{\nu_1}}{\nu_1!} \frac{(x_2 - a_2)^{\nu_2}}{\nu_2!} \dots \frac{(x_n - a_n)^{\nu_n}}{\nu_n!}$$

wo die neben der Ableitung von f stehenden Werthe für x_n anzeigen sollen, dafs man der Ableitung den Werth zu ertheilen hat, welchen sie an der Stelle (a) besitzt.

Wir führen die hier gebrauchte Bezeichnung für die Ableitungen auch in dem Falle einer Function einer Variablen ein, schreiben aber statt runder grade d , um ein Unterscheidungszeichen für die vollständige und die oben vorkommende theilweise (partielle) Ableitung nach einer der Variablen x , zu besitzen, und erhalten:

$$\begin{aligned} & f(x+h) \\ &= f(x) + \frac{df(x)}{dx} \frac{h}{1} + \frac{d^2 f(x)}{dx^2} \frac{h^2}{2!} + \cdots + \frac{d^n f(x)}{dx^n} \frac{h^n}{n!}, \\ & f(x) = \left(f(x) \right)_{x=a} + \\ &+ \left(\frac{df(x)}{dx} \right)_a \frac{x-a}{1} + \left(\frac{d^2 f(x)}{dx^2} \right)_a \frac{(x-a)^2}{2!} + \cdots + \left(\frac{d^n f(x)}{dx^n} \right)_a \frac{(x-a)^n}{n!}. \end{aligned}$$

Man ordne die ganze Function noch in anderer Weise, bilde in jedem Gliede

$$A_{m_1 m_2 \dots m_n} x_1^{m_1} x_2^{m_2} \dots x_n^{m_n}$$

die Summe der Exponenten ($m_1 + m_2 + \dots + m_n$) die sogenannte *Gradzahl des Gliedes* und fasse die Glieder gleichen Grades zusammen.

Nennt man eine ganze Function, deren Glieder alle denselben Grad besitzen, ganze *homogene* Function, so läßt sich jede ganze Function f als Summe homogener Functionen

$$f_0 + f_1 + \cdots + f_m$$

darstellen, in welchen der Index den Grad des Gliedes anzeige. Die höchste dieser Gradzahlen m heißt die *Dimension* der Function f .

Ist eine ganze Function f ohne constantes Glied f_0 gegeben,

$$f = f_1 + f_2 + \cdots + f_m,$$

so ist f in der Umgebung der Stelle (0) eine stetige veränderliche Gröfse.

Bezeichnet nämlich g_μ eine positive Gröfse, die größer ist als der größte unter den Beträgen der Coefficienten in der homogenen Function f_μ , so ist

$$|f_\mu| < g_\mu (|x_1| + |x_2| + \cdots + |x_n|)^\mu.$$

Ist ferner g eine positive Gröfse, größer als jedes der g_μ , und nennt

man die Summe $\sum_{\nu=1}^n |x_\nu| \xi$, so wird:

$$|f(x_1, x_2, \dots, x_n)| < g(\xi + \xi^2 + \cdots + \xi^m) < g\xi \frac{1}{1-\xi}.$$

Jetzt kann man aber ξ so wählen, daß $g\xi \frac{1}{1-\xi}$ kleiner wird als eine beliebig kleine Gröfse δ , und darum gibt es auch eine Umgebung r der Stelle (0) derart, daß für jede Stelle derselben

$$|f(x_1, x_2, \dots, x_n)| < \delta$$

wird und das ist die nothwendige Bedingung für die Stetigkeit der Function f in dem genannten Bereiche.

Aus der Darstellung jeder ganzen Function $f(x_1, x_2 \dots x_n)$ als Summe einer endlichen Anzahl von Gliedern:

$$A_{m_1 m_2 \dots m_n} (x_1 - a_1)^{m_1} (x_2 - a_2)^{m_2} \dots (x_n - a_n)^{m_n}$$

folgt aber, daß jede ganze Function in der Umgebung jeder endlichen Stelle (a) stetig ist, denn man kann den absoluten Betrag von

$$f(x_1, x_2, \dots x_n) - (a_1, a_2, \dots a_n)$$

oder

$$f(x_1, x_2 \dots x_n) - \left(\frac{\partial^0 f(x_1, x_2 \dots x_n)}{\partial x_1^0 \partial x_2^0 \dots \partial x_n^0} \right)_{a_1, a_2, \dots a_n}$$

kleiner machen als eine beliebig kleine Größe δ , indem man die Variabeln $x_1, x_2 \dots x_n$ in hinreichend kleiner Umgebung der Stelle (a) erhält.

§ 22. Gemeinsame Theiler zweier ganzer Functionen mehrerer Variabeln.

Wir fassen auch wieder das gegenseitige Verhalten zweier ganzer Functionen $f(x_1, x_2 \dots x_n)$ und $g(x_1, x_2 \dots x_n)$ ins Auge.

Vor Allem läßt sich den früheren Sätzen das Theorem entnehmen:

Die Function $g(x_1, x_2 \dots x_n)$, als eine von x_1 abhängige Größe betrachtet, wird bei jedem Werthesystem $x_2, x_3 \dots x_n$ ein Theiler der ganzen Function f von x_1 sein, wenn so viele ganze Functionen von $x_2, x_3 \dots x_n$ identisch verschwinden, als der Grad von g in x_1 anzeigt.

Für ganze Functionen f_n und g_m einer Variabeln bestand eine bestimmte Gleichung

$$b_0^{n-m+1} f_n = p_{n-m} g_m + q_{m-1},$$

und damit f_n durch g_m theilbar war, mußte q_{m-1} identisch verschwinden. Indem nun in unserem Falle die Coefficienten von q_{m-1} ganze Ausdrücke in den Variabeln $x_2, x_3 \dots x_n$ werden, ist die Behauptung richtig.

Um aber zeigen zu können, daß unter den genannten Bedingungen, die auf das Verschwinden ganzer Ausdrücke in den Constanten von f und g , zurückkommen, f überhaupt durch g theilbar ist, als Function welcher Variabeln wir auch f und g auffassen, und daß dann

$$f(x_1, x_2 \dots x_n) = k(x_1, x_2, \dots x_n) \cdot g(x_1, x_2 \dots x_n)$$

wird, setzen wir mit Weierstraß, in der Vermuthung, den Beweis mit Hilfe des Schlusses von $(n - 1)$ auf n erbringen zu können, fest:

- 1) Für zwei oder mehrere Functionen von $(n - 1)$ Variabeln mit einem gemeinsamen Theiler gibt es auch einen größten Theiler,

der durch die Eigenschaft definirt ist, daß er ein Vielfaches jedes gemeinsamen Theilers ist.

- 2) Sind f und g ganze Functionen von $(n-1)$ Variablen ohne gemeinsamen Theiler und keine dritte Function dieser Variablen, so ist jeder Theiler von fk und g ein Theiler von k .
- 3) Mehrere Functionen von $(n-1)$ Variablen besitzen auch gemeinsame Vielfache und es existirt eines, das in allen übrigen als Theiler vorkommt. —

Ferner bemerken wir, daß eine Function $f(x_1, x_2 \dots x_n)$, die bei jedem Werthe von x_1 durch $g(x_2, x_3 \dots x_n)$ theilbar ist, die Gestalt

$$g(x_2, x_3, \dots x_n) \cdot k(x_1, x_2, \dots x_n)$$

besitzt.

In der That: ist

$$f(x_1, x_2, \dots x_n) = f_0(x_2, x_3 \dots x_n)x_1^{n_1} + f_1(x_2, x_3, \dots x_n)x_1^{n_1-1} + \dots + f_n(x_2, x_3, \dots x_n),$$

so kann man die $(n_1 + 1)$ Functionen f_v als lineare Function der in der Darstellung:

$$f(x_1, x_2, \dots x_n)$$

$$= \sum_{\mu=1}^{n_1+1} f(\xi_\mu, x_2, x_3 \dots x_n) \frac{(x-\xi_1) \dots (x-\xi_{\mu-1})(x-\xi_{\mu+1}) \dots (x-\xi_{n_1+1})}{(\xi_\mu-\xi_1) \dots (\xi_\mu-\xi_{\mu-1})(\xi_\mu-\xi_{\mu+1}) \dots (\xi_\mu-\xi_{n_1+1})}$$

vorkommenden Größen $f(\xi_\mu, x_2, \dots x_n)$ ausdrücken, die der Voraussetzung nach durch $g(x_2, x_3 \dots x_n)$ theilbar sind. (Unter $\xi_1, \xi_2 \dots \xi_{n_1+1}$ sind ganz beliebige endliche Größen zu verstehen.) Deshalb werden die Functionen $f_v(x_2, x_3 \dots x_n)$ durch g theilbar sein und der Satz erscheint erwiesen.

Ist nun $f(x_1^{(n)}, x_2, \dots x_n)$ durch eine Function

$$g(x_1, x_2, \dots x_n) = g_0 x_1^m + g_1 x_1^{m-1} + \dots + g_m,$$

wo die Functionen $g_0, g_1 \dots g_m$ keinen gemeinsamen Theiler besitzen, theilbar in Hinsicht auf die Variable x_1 , so wird

$$g_0^{n-m+1} f - p_{n-m} g = q_{n-1} = 0,$$

oder wenn man

$$g_0^{n-m+1}(x_2, x_3 \dots x_n) = \gamma$$

setzt,

$$\gamma f - p_{n-m} g = 0.$$

Zufolge der Voraussetzung über die Beschaffenheit der Functionen $g_0, g_1 \dots g_m$ kann γ kein Theiler von g sein, γ muß vielmehr in p_{n-m} als Theiler vorkommen und dann wird

$$f(x_1, x_2, \dots x_n) = g(x_1, x_2, \dots x_n) k(x_1, x_2 \dots x_n), \text{ w. z. b. w.}$$

Besitzen f und g als Functionen von x_1 einen gemeinsamen Theiler k^{ten} Grades Θ , so existirt einmal eine Gleichung

$$\varphi g + \psi f = \Theta.$$

Die aus den Coefficienten der x_1 Potenzen in f und g gebildeten Coefficienten von φ , ψ , Θ werden hierin gebrochene rationale Ausdrücke sein können, aber es ist klar, daß man Θ die Form

$$x_1^k + \frac{\Theta_1}{\Theta_0} x_1^{k-1} \dots + \frac{\Theta_k}{\Theta_0}$$

geben kann, wo die Coefficienten Θ_k ganze Ausdrücke in den Variablen $x_2, x_3, \dots x_n$ sind.

Wir denken die gemeinsamen Theiler dieser k -Functionen von $(n-1)$ Variablen weggeschafft, und bezeichnen:

$$\Theta_0 x_1^k + \Theta_1 x_1^{k-1} + \dots + \Theta_k = \vartheta(x_1, x_2 \dots x_n),$$

dann erfordert die Voraussetzung, f besitze als Function von x_1 den Theiler Θ , die Existenz einer Beziehung

$$M(x_2, x_3 \dots x_n) f(x_1, x_2 \dots x_n) = N(x_1, x_2, \dots x_n) \vartheta(x_1, x_2 \dots x_n),$$

wo M und N ganze Ausdrücke bedeuten. Die Function M muß in N oder ϑ als Theiler vorkommen, kann aber nicht Theiler von ϑ sein, weil die Functionen Θ_k keinen gemeinsamen Theiler mehr besitzen sollen, defshalb wird

$$f(x_1, x_2 \dots x_n) = \vartheta(x_1, x_2 \dots x_n) P(x_1, x_2 \dots x_n)$$

und entsprechend

$$g(x_1, x_2 \dots x_n) = \vartheta(x_1, x_2, \dots x_n) Q(x_2, x_3, \dots x_n).$$

Wir finden demnach, daß $\vartheta(x_1, x_2, \dots x_n)$ auch als Function von $x_2, x_3, \dots x_n$ betrachtet gemeinsamer Theiler von f und g ist, sobald die Functionen Θ_k von den gemeinsamen Theilern von $(n-1)$ Variablen befreit sind.

Man kann nunmehr die gemeinsamen Theiler zweier ganzen Functionen von n Variablen angeben, wenn man die Theiler von Functionen von $(n-1)$ Variablen zu finden vermag, und da die Lösung dieser Aufgabe in dem Falle *einer* Variablen auszuführen ist, muß sie allgemein möglich sein.

Wir haben in $\vartheta(x_1, x_2, \dots x_n)$ den größten Theiler von f und g angegeben, der alle gemeinsame Theiler dieser Functionen enthält, denn die Functionen P und Q erfüllen die Gleichung:

$$\psi Q + \varphi P = 1,$$

die aussagt, daß Q und P als Functionen der Variablen x_1 keinen gemeinsamen Theiler besitzen und dann können sie auch als Functionen von x , keinen gemeinsamen Theiler haben. —

Ist die Function g nicht in f enthalten, wohl aber ein Theiler des Productes fk , so besteht eine Gleichung:

$$\varphi g + \psi f = 1,$$

in welcher die Coefficienten von φ und ψ den kleinsten gemeinsamen

Nenner $n(x_2, x_3 \dots x_n)$ besitzen mögen. Dividirt man hierauf die Gleichung

$$\varphi k g + \psi f k = k$$

durch g , so folgt eine Beziehung:

$$\frac{K(x_1, x_2 \dots x_n)}{n(x_2, \dots x_n)} = \frac{k}{g}$$

oder

$$k \cdot n(x_2 \dots x_n) = g \cdot K(x_1, x_2, \dots x_n).$$

Setzen wir fest, daß g nicht in das Product zweier ganzer Functionen zerlegbar sei, deren eine bloß $(n - 1)$ Variable enthält, so wird

$$k = g \cdot K'(x_1, x_2 \dots x_n),$$

d. h. K ist durch n und k durch g theilbar.

Endlich besteht auch für ganze Functionen von n Variabeln der Satz:

Jedes Vielfache zweier Functionen f und g ohne gemeinsamen Theiler ist durch $f g k$ und jedes Vielfache von $f = \varphi \vartheta$ und $g = \psi \vartheta$ durch $\varphi \psi \vartheta k$ gegeben.

§ 23. Rationale gebrochene Functionen.

Handelt es sich nun darum, den Quotienten ganzer Functionen f und g , d. h. die rationale gebrochene Function

$$F(x_1, x_2, \dots x_n) = \frac{f(x_1, x_2, \dots x_n)}{g(x_1, x_2, \dots x_n)}$$

zu untersuchen, die an jeder Stelle, die nicht Nullstelle des Nenners ist, einen bestimmten Werth besitzt, so können wir f und g von dem größten gemeinsamen Theiler ϑ befreit denken, denn

$$F = \frac{f}{g} = \frac{\varphi \vartheta}{\psi \vartheta}$$

hat an allen Stellen, die nicht Nullstellen von ϑ sind, den Werth, welchen $\frac{\varphi}{\psi}$ daselbst besitzt, und der Werth von F an einer Nullstelle $(x^{(0)})$ von ϑ darf wieder als der Werth von

$$\frac{\varphi((x^{(0)}))}{\psi((x^{(0)}))}$$

definirt werden, indem der Werth von F nach eben diesem convergirt, wenn die Stelle (x) nach $(x^{(0)})$ convergirt.

Zur Beurtheilung der Beschaffenheit der rationalen Function F haben wir demnach nur mehr die Fälle zu untersuchen, wo der Nenner g aber der Zähler f nicht verschwindet, oder wo g und f dieselbe Nullstelle besitzen, ohne daß das gleichzeitige Verschwinden von f

und g durch das Nullwerden eines gemeinschaftlichen Theilers verursacht ist.

Verswindet g an einer Stelle (a) , ist aber $|f((a))| > 0$, so wird der absolute Betrag von F für die der Stelle (a) unendlich benachbarten Stellen größer als jede angebbare Gröfse G und dann sagt man, F wird an der Stelle (a) selbst unendlich.

In der That: nach Annahme einer beliebig kleinen Gröfse δ kann man zunächst eine Umgebung (r) von (a) so bestimmen, daß für alle Stellen derselben

$$\delta > |f((x)) - f((a))| \geq | |f((x))| - |f((a))| |,$$

und somit

$$|f((x))| > |f((a))| - \delta$$

wird. Wählt man hierauf eine positive Gröfse γ so klein, daß

$$\frac{|f((a))| - \delta}{\gamma} > G,$$

und γ selbst noch größer ist als der größte der Werthe:

$$|g(x_1, x_2, \dots x_n) - g((a))| = |g((x))|$$

aus der Umgebung (r) von (a) , was bei hinreichend kleiner Umgebung (r) gewiß möglich ist, so wird die den genannten Stellen (x) entsprechende Ungleichung für $\left| \frac{f}{g} \right|$ noch zutreffender als die angegebene, und deshalb ist die Behauptung erwiesen.

Verswinden aber g und f an derselben Stelle (a) , dann hat der Quotient der ganzen Functionen mehrerer Variablen in unendlich kleiner Umgebung jeden beliebigen Werth und an dieser Stelle selbst keinen bestimmten Werth. Die rationale Function erscheint an der Stelle (a) nicht bloß in der unbestimmten Form $\frac{0}{0}$, sondern ist daselbst wirklich unbestimmt.

Dieser Satz wird bewiesen sein, wenn man in einer unendlich kleinen Umgebung von (a) Werthesysteme $(x_1, x_2, \dots x_n)$ finden kann, für welche f oder $f - Ag$ verschwindet, ohne daß g Null ist, denn dann wird

$$F = \frac{f}{g} = \frac{f - Ag}{g} + A$$

Null respective A , und wenn man ferner Stellen angeben kann, an denen g aber nicht f Null ist, denn dann wird F auch unendlich.

Es kommt nur darauf an, einen dieser Fälle auszuführen, wobei wir die Existenz der Nullstellen einer ganzen Function wieder voraussetzen müssen. — Wir fragen demnach, ob man Werthesysteme

$$x_v = a_v + h_v \quad (v = 1, 2 \dots n)$$

finden kann, für die

$$f(a_1 + h_1, a_2 + h_2, \dots, a_n + h_n) \\ = \sum_{v_1, v_2, \dots, v_n} \left(\frac{\partial^{v_1+v_2+\dots+v_n} f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1^{v_1} \partial x_2^{v_2} \dots \partial x_n^{v_n}} \right) \frac{h_1^{v_1}}{v_1!} \frac{h_2^{v_2}}{v_2!} \dots \frac{h_n^{v_n}}{v_n!} \\ a_1, a_2, \dots, a_n$$

verschwindet, indessen

$$|g(a_1 + h_1, a_2 + h_2, \dots, a_n + h_n)| > 0$$

wird.

Der Strich bei dem Summenzeichen soll anzeigen, daß v_1, v_2, \dots, v_n nicht gleichzeitig Null zu setzen sind, indem $f(a_1, a_2, \dots, a_n) = 0$ ist.

Stellt man $f(a + h)$ in der Form dar:

$$A_0 h_1^{n_1} + A_1 h_1^{n_1-1} + \dots + A_{n_1},$$

so bezeichnen die Coefficienten A_i ganze Functionen von h_2, h_3, \dots, h_n . A_{n_1} wird mit den Größen h_2, h_3, \dots, h_n unendlich klein, denn A_{n_1} kann kein constantes Glied enthalten, indem f die Nullstelle (a) besitzt.

Um eine Stelle ($a + h$) der verlangten Art zu finden, wähle man für h_2, h_3, \dots, h_n ein System von Werthen in unendlich kleiner Umgebung der Stelle (0) und den zugehörigen Werth von h_1 entnehme man der Gleichung:

$$A_0 h_1^{n_1} + A_1 h_1^{n_1-1} + \dots + A_{n_1} = 0.$$

Dabei darf man natürlich h_2, h_3, \dots, h_n nicht solche Werthe geben, daß die Resultante der Functionen f und g

$$R(x_2, x_3, \dots, x_n)$$

die Nullstelle ($a_2 + h_2, a_3 + h_3, \dots, a_n + h_n$) besitzt, sonst könnte auch g daselbst verschwinden. Da die Resultante zweier Functionen f und g , welche keinen gemeinsamen Theiler haben, nicht identisch verschwinden wird, muß es möglich sein, solche Werthe zu finden, und es fragt sich nur, ob jedem dieser Bedingung gehorchenden Werthesysteme (h_2, h_3, \dots, h_n) ein h_1 von unendlich kleinem absoluten Betrage zugehören kann.

Das Product der unserer Gleichung genügenden Werthe h_1 ist

$$(-1)^{n_1} \frac{A_{n_1}}{A_0}.$$

Damit also eine Wurzel h_1 von unendlich kleinem Betrage existirt, muß $\left| (-1)^{n_1} \frac{A_{n_1}}{A_0} \right|$ mit h_2, h_3, \dots, h_n unendlich klein werden. Wenn $A_0(h_2, h_3, \dots, h_n)$ mit h_2, h_3, \dots, h_n nicht unendlich klein wird, oder A_0 ein von den Größen h freies Glied enthält, gibt es gewiß eine Wurzel h_1 der verlangten Art, denn A_{n_1} enthält keine Constante. Aber A_0 besitzt eine Constante, sobald in $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ der Coefficient von $x_1^{n_1}$ ein von den Größen x_2, \dots, x_n freies Glied enthält.

Andernfalls müssen wir zur Untersuchung der Beschaffenheit von F an der Stelle (a) eine lineare Transformation vornehmen, d. h. wir müssen $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ in eine rationale Function neuer Variablen y_1, y_2, \dots, y_n umwandeln, die mit den ersten durch n lineare Gleichungen verbunden sind.

Diese Gleichungen seien

$$x_v = \alpha_{v1} y_1 + \alpha_{v2} y_2 + \dots + \alpha_{vn} y_n \quad (v = 1, 2, \dots, n)$$

und die Coefficienten seien nur den Beschränkungen unterworfen, daß die Determinante

$$\begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \dots & \alpha_{nn} \end{vmatrix}$$

von Null verschieden ist und in $F(y_1, y_2, \dots, y_n)$ eine der Potenzen $y_v^{\alpha_v}$ ($v = 1, 2, \dots, n$) ein constantes Glied besitzt. Dann entspricht jeder Stelle (x) eine und nur eine Stelle (y) und umgekehrt, und in unendlich kleiner Umgebung der der Stelle (a) entsprechenden Stelle $y_v = b_v$ ($v = 1, 2, \dots, n$), an der $f(y_1, y_2, \dots, y_n)$ und $g(y_1, y_2, \dots, y_n)$ verschwinden, gibt es Stellen $b_v + \eta_v$ ($v = 1, 2, \dots, n$), wo $f((y))$ Null wird und $g((y))$ nicht verschwindet.

Diesen Stellen entsprechen Stellen $(a_1 + h)$ in unendlich kleiner Umgebung von (a) , für die $f((x))$ aber nicht $g((x))$ Null wird.

Der obige Satz ist daher in allen Theilen bewiesen.

Wir behaupten nun noch, daß die rationale gebrochene Function

$$F = \frac{f}{g}$$

in der Umgebung jeder unendlichen Stelle (x) , die nicht Nullstelle des Nenners ist, eine stetig veränderliche GröÙe sei.

In der That: bezeichnen Δf und Δg die GröÙen, um welche sich f und g ändern, wenn die Argumente x_1, x_2, \dots, x_n in $x_1 + h_1, x_2 + h_2, \dots, x_n + h_n$ übergehen, so wird

$$\begin{aligned} & F(x_1 + h_1, x_2 + h_2, \dots, x_n + h_n) - F(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &= \Delta F = \frac{f + \Delta f}{g + \Delta g} - \frac{f}{g} = \frac{g\Delta f - f\Delta g}{g^2 + g\Delta g} = \frac{g\Delta f - f\Delta g}{g^2} - \frac{g\Delta f - f\Delta g}{g(g^2 + g\Delta g)} \Delta g \end{aligned}$$

und es ist ersichtlich gemacht, daß man Δf und Δg oder die GröÙen h_1, h_2, \dots, h_n so wählen kann, daß $|\Delta F|$ kleiner wird als eine beliebige kleine GröÙe δ , wofern nur g an der Stelle (x) nicht verschwindet. Die rationale gebrochene Function ist deshalb an allen Stellen des $2n$ -fach ausgedehnten, im Endlichen gelegenen Bereiches stetig, mit Ausnahme der Nullstellen ihres Nenners.

§ 24. Lagrange'sche Interpolationsformel.

Summen gleicher Potenzen der Wurzeln einer Gleichung.

Wir haben in diesem Capitel noch eine Reihe von Sätzen über die ganzen und gebrochenen rationalen Functionen einer Variablen vorzutragen, die eine mannigfache Verwehdung finden werden. Wir beginnen mit einer Umgestaltung der Lagrange'schen Formel.

Jede ganze Function n^{ten} Grades war in der Form dargestellt:

$$f(x) = f(x_1) + f^{(1)}(x_1) \frac{x-x_1}{1} + f^{(2)}(x_1) \frac{(x-x_1)^2}{2!} + \dots + f^{(n)}(x_1) \frac{(x-x_1)^n}{n!},$$

und wenn $f(x)$ die ν -fache Nullstelle x_1 besitzt, wird

$$f(x) = (x-x_1)^\nu \left[\frac{1}{\nu!} f^{(\nu)}(x_1) + f^{(\nu+1)}(x_1) \frac{x-x_1}{(\nu+1)!} + \dots + f^{(n)}(x_1) \frac{(x-x_1)^{n-\nu}}{n!} \right].$$

Der Werth des Quotienten von $f(x)$ und $(x-x_1)^\nu$ an der Stelle x_1 ist, wie wir nun wissen, nicht etwa

$$\frac{0}{0} \frac{f^{(\nu)}(x_1)}{\nu!},$$

sondern es gilt

$$\left(\frac{f(x)}{(x-x_1)^\nu} \right)_{x=x_1} = \frac{1}{\nu!} f^{(\nu)}(x_1).$$

Gehen wir auf die Bestimmung der ganzen Function n^{ten} Grades zurück, wenn deren Werth für $(n+1)$ Variablenwerthe $\xi_1, \xi_1, \dots, \xi_{n+1}$ gegeben ist:

$$f(\xi_\nu) = \eta_\nu \quad (\nu = 1, 2, \dots, n+1),$$

setzen jetzt

$$\prod_{\nu=1}^{n+1} (x - \xi_\nu) = \varphi(x),$$

so wird

$$\begin{aligned} & (\xi_\nu - \xi_1) \dots (\xi_\nu - \xi_{\nu-1}) (\xi_\nu - \xi_{\nu+1}) \dots (\xi_\nu - \xi_{n+1}) \\ &= \left(\frac{\varphi(x)}{x - \xi_\nu} \right)_{x=\xi_\nu} = \varphi^{(1)}(\xi_\nu) \end{aligned}$$

und die Lagrange'sche Formel erhält die Gestalt:

$$f(x) = \sum_{\nu=1}^{n+1} \frac{\eta_\nu}{\varphi^{(1)}(\xi_\nu)} \frac{\varphi(x)}{x - \xi_\nu} = \sum_{\nu=1}^{n+1} \frac{f(\xi_\nu)}{\varphi^{(1)}(\xi_\nu)} \cdot \frac{\varphi(x)}{x - \xi_\nu}.$$

Es erscheint hier wichtig, die erste Ableitung einer ganzen Function mit n Nullstellen, welche also die Darstellung

$$f(x) = a_0 \prod_{\nu=1}^n (x - x_\nu)$$

zuläfst, direct bilden zu können.

Die erste Ableitung ist zufolge der Formel

$$f(x+h) = f(x) + f^{(1)}(x) \frac{h}{1} + f^{(2)}(x) \frac{h^2}{2!} + \dots + f^{(n)}(x) \frac{h^n}{n!}$$

der Coefficient von h in dem entwickelten Producte

$$a_0 \prod_{v=1}^n (x + h - x_v).$$

Anstatt aber dieses Product auszuführen und jenen Coefficienten herauszunehmen, bemerken wir, daß man den Quotienten der ersten Ableitung und $f(x)$ finden kann, indem man den Coefficienten von h in der rationalen Function

$$\frac{f(x+h)}{f(x)} = \prod_{v=1}^n \left(\frac{x+h-x_v}{x-x_v} \right) = \prod_{v=1}^n \left(1 + \frac{h}{x-x_v} \right)$$

heraushebt. Da ergibt sich unmittelbar die Formel

$$\frac{f'(x)}{f(x)} = \sum_{v=1}^n \frac{1}{x-x_v}$$

oder

$$f'(x) = f(x) \cdot \sum_{v=1}^n \frac{1}{x-x_v}.$$

Hat die vorgegebene Function mehrfache Nullstellen und ist

$$f(x) = a_0 \prod_{\mu=1}^m (x-x_\mu)^{n_\mu} \quad \left(\sum_{\mu=1}^m n_\mu = n \right),$$

so wird

$$f'(x) = f(x) \cdot \sum_{\mu=1}^m \frac{n_\mu}{x-x_\mu}.$$

Dieser Formel entnehmen wir die Beziehung:

$$f'(x) \cdot \prod_{\mu=1}^m (x-x_\mu) - f(x) \cdot \sum_{\mu=1}^m n_\mu (x-x_1) \dots (x-x_{\mu-1}) (x-x_{\mu+1}) \dots (x-x_m) = 0,$$

die wir in der Form

$$f'(x) \varphi_m - f(x) \psi_{m-1} = 0$$

anschreiben, um auch gleich abzulesen, daß $f(x)$ und $f'(x)$ einen gemeinsamen Theiler $(n-m)$ ten Grades besitzen. Dieser Theiler heißt

$$\prod_{\mu=1}^m (x-x_\mu)^{n_\mu-1}$$

und darum wird die n_μ fache Nullstelle der Function $f(x)$ eine $(n_\mu-1)$ -fache Nullstelle der ersten Ableitung $f'(x)$.

Weil die ν te Ableitung von $f(x)$ die erste von $f^{(\nu-1)}(x)$ ist, wird ferner die n_μ fache Nullstelle von $f(x)$ eine $(n_\mu-\nu)$ fache Nullstelle der ν ten Ableitung.

Wenn man die beiden Ausdrücke für die Ableitung einer ganzen Function mit n Nullstellen:

$$f(x) = \prod_{v=1}^n (x - x_v) = x^n + a_1 x^{n-1} + a_2 x^{n-2} + \dots + a_n$$

d. i.

$$f'(x) = \sum_{v=1}^n \frac{f(x)}{x - x_v}$$

und

$$f'(x) = nx^{n-1} + a_1(n-1)x^{n-2} + \dots + a_{n-1}$$

mit einander vergleicht, ergibt sich ein bemerkenswerther Satz für die Summe gleicher Potenzen der Wurzeln der Gleichung $f(x) = 0$.

Es folgt durch Division:

$$\begin{aligned} \frac{f(x)}{x - x_v} &= x^{n-1} + (x_v + a_1)x^{n-2} + (x_v^2 + x_v a_1 + a_2)x^{n-3} + \dots \\ &\quad + (x_v^{n-1} + x_v^{n-2} a_1 + \dots + x_v a_{n-2} + a_{n-1}), \end{aligned}$$

und wenn man

$$x_1^v + x_2^v + \dots + x_n^v = s_v$$

setzt, wird

$$\begin{aligned} \sum_{v=1}^n \frac{f(x)}{x - x_v} &= nx^{n-1} + (s_1 + na_1)x^{n-2} + (s_2 + s_1 a_1 + na_2)x^{n-3} + \dots \\ &\quad + (s_{n-1} + s_{n-2} a_1 + \dots + s_1 a_{n-2} + na_{n-1}). \end{aligned}$$

Jetzt gibt der Vergleich dieses Ausdruckes für $f'(x)$ mit dem zweiten der oben genannten die Beziehungen:

$$s_1 + a_1 = 0$$

$$s_1 + s_1 a_1 + 2a_2 = 0$$

$$s_3 + s_2 a_1 + s_1 a_2 + 3a_3 = 0$$

$$\dots \dots \dots$$

$$s_{n-1} + s_{n-2} a_1 + s_{n-3} a_2 + s_{n-4} a_3 + \dots + s_1 a_{n-2} + (n-1)a_{n-1} = 0,$$

aus denen man successive die Werthe für die *Potenzsummen* s_v ermitteln kann:

$$s_1 = -a_1$$

$$s_2 = a_1^2 - 2a_2$$

$$s_3 = -a_1^3 + 3a_1 a_2 - 3a_3$$

$$\dots \dots \dots$$

und endlich s_{n-1} ; s_0 ist gleich n .

Um die Summe der n^{ten} und höherer Potenzen der Wurzeln zu finden, bilde man

$$x^m f(x) = x^{n+m} + a_1 x^{n+m-1} + \dots + a_n x^m = 0,$$

ersetze hierin x der Reihe nach durch x_1, x_2, \dots, x_n und addire die Resultate, dann entsteht die Relation

$$s_{n+m} + a_1 s_{n+m-1} + \dots + s_{m+1} a_{n-1} + s_m a_n = 0,$$

aus der die verlangten Summen successive hervorgehen, indem man $m = 0, 1, 2 \dots$ setzt.

Alle Summen s_k sind ganze rationale Functionen der Coefficienten $a_1, a_2, \dots a_n$, und umgekehrt die Coefficienten ganze rationale Functionen von n Potenzsummen s_k ($k > 0$). —

Ist

$$f(x) = x^n - 1,$$

so wird

$$s_0 = s_n = s_{2n} = \dots = s_{kn} = n,$$

wo k irgend eine ganze Zahl bezeichnet, und die Summen von Potenzen der n Wurzeln der Gleichung $f(x) = 0$, deren Exponenten nicht Vielfache von n sind, werden Null.

Unter dem früheren m kann man auch eine ganze negative Zahl verstehen, nur folgen dann die Summen gleicher Potenzen mit negativen Exponenten. —

Alle die genannten Summen

$$s_\mu = x_1^\mu + x_2^\mu + \dots + x_n^\mu$$

bleiben als Functionen der n Gröſsen $x_1, x_2, \dots x_n$ ihrer Form und ihrem Werthe nach ungeändert, wenn man irgend welche Umsetzungen der Gröſsen $x_1, x_2, \dots x_n$ vornimmt.

Ausdrücke von n Elementen $x_1, x_2, \dots x_n$, die ihre Form bei gegenseitigen Vertauschungen der Elemente nicht ändern, heißen *symmetrisch*.

Die Coefficienten der Gleichung n^{ten} Grades

$$x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_n = \prod_{v=1}^n (x - x_v) = 0$$

sind solche symmetrische Ausdrücke der n Wurzeln, denn bei irgend welchen Vertauschungen der Gröſsen x_v in

$$a_\mu = (-1)^\mu \sum_{v, v', \dots v^{(\mu)}} x_v x_{v'} \dots x_{v^{(\mu)}} \quad (\mu = 1, 2 \dots n)$$

geht jeder Summand in einen anderen über.

Der symmetrische Ausdruck erfährt bei den Stellungsänderungen der x_v offenbar keine Werthänderung.

*Umgekehrt ist eine ganze rationale Function $f(x_1, x_2, \dots x_n)$ der als veränderlich betrachteten Gröſsen $x_1, x_2, \dots x_n$ in diesen symmetrisch, sobald sie bei beliebigen Vertauschungen der Gröſsen $(x_1, x, \dots x_n)$ keine Werthänderung erfährt. *)*

*) Vergl. Netto's Substitutionentheorie.

Die Function

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_0(x_2, x_3, \dots, x_n)x_1^{n_1} + f_1(x_2, x_3, \dots, x_n)x_1^{n_1-1} + \dots + f_{n_1}(x_2, x_3, \dots, x_n)$$

möge bei einer Vertauschung der Größen x_v in

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \varphi_0(x_2, x_3, \dots, x_n)x_1^{n_1'} + \varphi_1(x_2, x_3, \dots, x_n)x_1^{n_1'-1} + \dots + \varphi_{n_1'}(x_2, x_3, \dots, x_n)$$

übergehen, dann sind die rechts stehenden Ausdrücke der Voraussetzung nach für jedes Werthesystem (x) einander gleich, und man erschließt, daß

$$n_1 = n_1', \quad f_0 \equiv \varphi_0, \dots, f_{n_1} \equiv \varphi_{n_1}$$

wird. —

Eine symmetrische ganze Function $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ läßt sich stets auf eine und nur eine Art als ganze rationale Function der n (oben genannten) symmetrischen Functionen a_1, a_2, \dots, a_n darstellen.

Ist ein Glied der Function $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ von der Form

$$x_1^{v_1} x_2^{v_2} \dots x_\mu^{v_\mu} \quad (\mu \leq n),$$

so kommen in derselben nothwendig alle durch Vertauschung der Größen x_v abzuleitenden Glieder vor, gibt es also ein Glied x_v^α , so enthält f alle Summanden von

$$\sum_{v=1}^{\alpha} x_v^\alpha = s_\alpha$$

und s_α ist eine ganze rationale Function der Größen a_1, a_2, \dots, a_n .

Die Summe aller durch Vertauschung aus $x_v^\alpha x_{v'}^{\alpha'}$ hervorgehenden Glieder

$$\sum_{v, v'} x_v^\alpha x_{v'}^{\alpha'}$$

wird gleich

$$s_\alpha s_{\alpha'} - s_{\alpha+\alpha'},$$

wie man bei der Bildung des Productes $s_\alpha s_{\alpha'}$ leicht übersieht, und ferner gilt

$$\sum_{v, v'} x_v^\alpha x_{v'}^\alpha = \frac{1}{2} (s_\alpha^2 - s_{2\alpha}).$$

Da

$$s_\alpha s_{\alpha''} \sum_{v, v'} x_v^\alpha x_{v'}^{\alpha'} = \sum_{v, v', v''} x_v^\alpha x_{v'}^{\alpha'} x_{v''}^{\alpha''} + \sum_{v, v'} x_v^{\alpha+\alpha'} x_{v'}^{\alpha''} + \sum_{v, v'} x_v^\alpha x_{v'}^{\alpha'+\alpha''}$$

ist, wird

$$\sum_{v, v', v''} x_v^\alpha x_{v'}^{\alpha'} x_{v''}^{\alpha''} = s_\alpha s_{\alpha'} s_{\alpha''} - (s_{\alpha+\alpha'} s_{\alpha''} + s_{\alpha'+\alpha''} s_\alpha + s_{\alpha+\alpha''} s_{\alpha'}) + 2s_{\alpha+\alpha'+\alpha''},$$

und so fortschreitend findet man, daß jede Summe

$$\sum_{v, v', \dots, v^{(\mu)}} x_v^{\alpha_1} x_{v'}^{\alpha_2} \dots x_{v^{(\mu)}}^{\alpha_\mu} \quad (\mu \leq n)$$

als ganze rationale Function der Potenzsummen oder der symmetrischen Functionen $a_1, a_2, \dots a_\mu$ darstellbar ist.

Setzen wir voraus, daß dieselbe ganze symmetrische Function $f(x_1, x_2, \dots x_n)$ sowohl durch $g_1(a_1, a_2, \dots a_n)$ als auch durch $g_2(a_1, a_2, \dots a_n)$ ausdrückbar sei, dann ist die Differenz

$$g_1 - g_2$$

zwar für alle Werthesysteme (x) identisch Null, aber als Function der Größen a soll sie nicht identisch verschwinden, denn sonst wären die Darstellungen für f gleich.

Die genannten Eigenschaften sind nicht miteinander verträglich, denn die Umsetzung von $g_1((a)) - g_2((a))$ in eine Function der Größen $x_1, x_2, \dots x_n$ gäbe eine nicht identisch verschwindende Function, die für jedes Werthesystem (x) Null sein soll.

Es gibt also nur eine Darstellung der ganzen symmetrischen Function $f(x_1, x_2, \dots x_n)$ als Function der Größen $a_1, a_2, \dots a_n$, welche die *elementarsymmetrischen Functionen* heißen.

§ 25. Darstellung der rationalen gebrochenen Function einer Variablen durch Partialbrüche.

Die oben gewonnene Formel

$$\frac{f'(x)}{f(x)} = \sum_{\mu=1}^m \frac{n_\mu}{x - x_\mu}$$

für den Quotienten der ganzen Functionen $f'(x)$ und $f(x)$ gibt die Anregung zu der allgemeinen Aufgabe:

Es ist der Quotient ganzer Functionen als Summe solcher rationaler gebrochener Functionen darzustellen, die einzeln an den Nullstellen des Nenners unendlich werden, oder, was dasselbe sagt, als Summe rationaler Functionen, deren Nenner die Primfactoren des Nenners der vorgegebenen Function sind.

Auch diese Aufgabe hat in der Theorie der rationalen gebrochenen Zahlen ihr Analogon.

Zwischen zwei ganzen Functionen von dem n^{ten} und m^{ten} Grade f_n und g_m ($n \geq m$) bestand eine Beziehung:

$$f_n = g_m p_{n-m} + q_{m-1},$$

aus der wir ablesen, daß der Quotient einer Function n^{ten} und m^{ten} Grades:

$$\frac{f_n}{g_m} = p_{n-m} + \frac{q_{m-1}}{g_m}$$

als Summe einer ganzen Function vom $(n - m)^{\text{ten}}$ Grade und eines Quotienten darstellbar ist, in welchem der Grad des Zählers kleiner ist als der des Nenners.

Angenommen, daß in einem solchen Quotienten $\frac{q_{m-1}}{g_m}$ der Nenner g_m als Product zweier ganzer Functionen $g^{(1)}$ und $g^{(2)}$ ohne gemeinsamen Theiler darzustellen sei, so kann man die Function $\frac{q_{m-1}}{g_m}$ als Summe zweier Quotienten ganzer Functionen ausdrücken, deren Nenner beziehungsweise die Factoren $g^{(1)}$ und $g^{(2)}$ sind.

Die Gradzahlen von $g^{(1)}$ und $g^{(2)}$ seien μ und ν ($\mu + \nu = m$), dann kann man diesen Functionen $g_\mu^{(1)}$ und $g_\nu^{(2)}$ zwei und nur zwei Functionen $\varphi_{\nu-1}$ und $\psi_{\mu-1}$ so zuordnen, daß die Gleichung

$$\varphi_{\nu-1} g_\mu^{(1)} + \psi_{\mu-1} g_\nu^{(2)} = 1$$

besteht. Es existirt deshalb eine Relation der Form:

$$\frac{1}{g_m} = \frac{\varphi_{\nu-1}}{g_\nu^{(2)}} + \frac{\psi_{\mu-1}}{g_\mu^{(1)}}$$

und dann wird

$$\frac{q_{m-1}}{g_m} = \frac{q_{m-1} \varphi_{\nu-1}}{g_\nu^{(2)}} + \frac{q_{m-1} \psi_{\mu-1}}{g_\mu^{(1)}}.$$

Setzt man

$$q_{m-1} \varphi_{\nu-1} = P_{m-2} g_\nu^{(2)} + Q_{\nu-1},$$

$$q_{m-1} \psi_{\mu-1} = -P'_{m-2} g_\mu^{(2)} + Q_{\mu-1},$$

so entsteht die Gleichung

$$\frac{q_{m-1}}{g_m} = (P_{m-2} - P'_{m-2}) + \frac{Q_{\nu-1}}{g_\nu^{(2)}} + \frac{Q_{\mu-1}}{g_\mu^{(1)}}$$

oder

$$q_{m-1} = (P_{m-2} - P'_{m-2}) g_m + Q_{\nu-1} g_\mu^{(1)} + Q_{\mu-1} g_\nu^{(2)}.$$

Da aber die ganze Function q_{m-1} nicht die Summe einer Function $2(m-1)^{\text{ten}}$ und zweier Functionen $(m-1)^{\text{ten}}$ Grades sein kann, muß hierin

$$P_{m-2} - P'_{m-2}$$

identisch verschwinden, und es folgt, daß eine *echt gebrochene* rationale Function, (in welcher der Zähler von niedrigerem Grade ist als der Nenner, und) in welcher der Nenner das Product zweier ganzer Functionen ohne gemeinsamen Theiler ist, als Summe zweier *echt gebrochener* rationaler Functionen dargestellt werden kann, deren Nenner die genannten Factoren sind.

In der Gleichung

$$\frac{q_{m-1}}{g_m} = \frac{Q_{\nu-1}}{g_\nu^{(2)}} + \frac{Q_{\mu-1}}{g_\mu^{(1)}}$$

sind die Functionen $Q_{\nu-1}$, $Q_{\mu-1}$ höchstens von den bezeichneten Graden. —

Die hier durchgeführte Zerlegung eines Quotienten $\frac{q_{m-1}}{g_m}$ in ein Aggregat zweier echt gebrochener rationaler Functionen läßt sich fortsetzen, indem wir dieselben Erwägungen auf die gewonnenen *Partialbrüche* $\frac{Q_{\nu-1}}{g_{\nu}^{(2)}}$, $\frac{Q_{\mu-1}}{g_{\mu}^{(1)}}$ anwenden.

Ist etwa

$$g = g_1 \cdot g_2 \cdots g_k$$

und besitzt keiner der Factoren g_x , deren Grad uns jetzt nicht interessiert, mit einem zweiten g_x einen gemeinsamen Theiler, so existirt eine ganz bestimmte Zerlegung

$$\frac{q_{m-1}}{g_m} = \frac{Q_1}{g_1} + \frac{Q_2}{g_2} + \cdots + \frac{Q_k}{g_k},$$

denn gäbe es eine zweite

$$\frac{q_{m-1}}{g_m} = \frac{P_1}{g_1} + \frac{P_2}{g_2} + \cdots + \frac{P_k}{g_k},$$

so kommen wir in Widerspruch mit der Voraussetzung über das gegenseitige Verhalten der Factoren g_k . In der That: weil in der nun hervorgehenden Gleichung

$$\sum_{x=1}^k (Q_x - P_x) \frac{g}{g_x} = 0$$

jeder Summand bis auf den x^{ten} den Factor g_x besitzt und dieser Summand darnach durch g_x theilbar sein soll, so müßte einer der Factoren g_x den Theiler g_x haben, indem die ganze Function $Q_x - P_x$ diesen Theiler gewiß nicht besitzt, weil ihr Grad niedriger ist als der von g_x .

Wir specialisiren diese Sätze und nehmen an, daß der Nenner $g(x)$ in der Form

$$\prod_{x=1}^k (x - \xi_x)^{m_x}$$

gegeben sei, wo die Summe der Exponenten m_x gleich m ist. Dann ist der Theiler

$$g_x = (x - \xi_x)^{m_x},$$

und ein Quotient $\frac{q_{m-1}}{g_m}$ zerfällt in die Summe:

$$\sum_{x=1}^k \frac{q_x(x)}{(x - \xi_x)^{m_x}},$$

wo der Grad des Zählers $q_x(x)$ den Werth $m_x - 1$ nicht überschreiten kann, so daß der Zähler die Gestalt erhält:

$$q_x(x) = c_{x,0} x^{m_x-1} + c_{x,1} x^{m_x-2} + \cdots + c_{x,m_x-1}.$$

Will man die Coefficienten c_x berechnen, so setze man in der Gleichung

$$q_{m-1}(x) = \prod_{x=1}^k (x - \xi_x)^{m_x} \cdot \sum_{x=1}^k \frac{q_x(x)}{(x - \xi_x)^{m_x}}$$

die angegebenen Ausdrücke für $q_x(x)$ mit den unbestimmten Coefficienten ein, setze nach Ausführung der Multiplicationen die Coefficienten gleich hoher Potenzen in q_{m-1} und in der ganzen Function rechts einander gleich, so erhält man zur Bestimmung der m Gröfßen c_x m lineare Gleichungen, deren Determinante nicht verschwinden wird,

weil es eine bestimmte Zerlegung für den Quotienten $\frac{q_{m-1}}{g_m}$ gibt.

Die rationalen Functionen

$$\frac{q_x(x)}{(x - \xi_x)^{m_x}},$$

in welchen $m_x > 1$ ist, kann man noch weiter zerlegen, was am einfachsten dadurch geschieht, dafs man

$$q_x(x) = q_x(\xi_x) + q'_x(\xi_x) \frac{x - \xi_x}{1} + \dots + q^{(m_x-1)}(\xi_x) \cdot \frac{(x - \xi_x)^{m_x-1}}{(m_x-1)!}$$

setzt. Es wird dann

$$\frac{q_x(x)}{(x - \xi_x)^{m_x}} = \sum_{\mu_x=0}^{m_x-1} \frac{q^{(\mu_x)}(\xi_x)}{\mu_x!} \cdot \frac{1}{(x - \xi_x)^{m_x-\mu_x}}.$$

Jetzt erscheint nachgewiesen, dafs der Quotient zweier rationaler Functionen f_n und g_m , deren Nenner die

$m_1, m_2, \dots m_k$ fachen

Nullstellen

$$x = a_1, a_2, \dots a_k$$

besitzt, auf die Form

$$\begin{aligned} \frac{f_n(x)}{g_m(x)} &= a_0 x^{n-m} + a_1 x^{n-m+1} + \dots + a_{n-m} \\ &+ \frac{A_1^{(1)}}{x - \alpha_1} + \frac{A_2^{(1)}}{(x - \alpha_1)^2} + \dots + \frac{A_{m_1}^{(1)}}{(x - \alpha_1)^{m_1}} \\ &+ \frac{A_1^{(2)}}{x - \alpha_2} + \frac{A_2^{(2)}}{(x - \alpha_2)^2} + \dots + \frac{A_{m_2}^{(2)}}{(x - \alpha_2)^{m_2}} \\ &\dots \dots \dots \\ &+ \frac{A_1^{(k)}}{x - \alpha_k} + \frac{A_2^{(k)}}{(x - \alpha_k)^2} + \dots + \frac{A_{m_k}^{(k)}}{(x - \alpha_k)^{m_k}} \end{aligned}$$

gebracht werden kann, wo neben den Coefficienten $A_{m_x}^{(x)}$ auch die Coefficienten $a_0, a_1, \dots a_{n-m}$ eindeutig bestimmt sind.

Im Falle einfacher Nullstellen erhält man die Formel:

$$\frac{f_n(x)}{g_m(x)} = p_{n-m}(x) + \sum_{x=1}^m \frac{A^{(x)}}{x - \alpha_x},$$

deren Coefficienten $A^{(x)}$ noch in anderer Weise als früher bestimmt werden sollen.

Bildet man die Gleichung

$$f_n(x) = p_{n-m}(x) g_m(x) + \sum_{x=1}^m \frac{A^{(x)} g_m}{x - \alpha_x}$$

und ersetzt hierin $g(x)$ durch

$$g'(\alpha_x) \frac{x - \alpha_x}{1} + g''(\alpha_x) \frac{(x - \alpha_x)^2}{2!} + \dots + g^{(m)}(\alpha_x) \frac{(x - \alpha_x)^m}{m!},$$

so geht die Gleichung für $x = \alpha_x$ in

$$f_n(\alpha_x) = A^{(x)} g'_m(\alpha_x)$$

über und deshalb wird

$$\frac{f_n(x)}{g_m(x)} = p(x) + \sum_{x=1}^m \frac{f(\alpha_x)}{g'(\alpha_x)} \frac{1}{x - \alpha_x}.$$

Ist der Grad von f kleiner als der von g , so fällt die ganze Function $p(x)$ aus dieser Gleichung heraus; ist $f(x)$ vom Grade $m-1$, so gibt der Vergleich gleichnamiger Potenzen in der Relation

$$f(x) = a_0 x^{m-1} + a_1 x^{m-2} + \dots + a_{m-1} = \sum_{x=1}^m \frac{f(\alpha_x)}{g'(\alpha_x)} \frac{g(x)}{x - \alpha_x},$$

dafs

$$a_0 = \sum_{x=1}^m \frac{f(\alpha_x)}{g'(\alpha_x)}$$

ist.

Wenn endlich die ganze Function f_n von niedrigerem als dem $(m-1)^{\text{ten}}$ Grade ist, so wird die Summe der Coefficienten der Partialbrüche, in welche der Quotient $\frac{f}{g_m}$ zerlegt ist,

$$A_1 + A_2 + \dots + A_m = \sum_{x=1}^m \frac{f(\alpha_x)}{g'(\alpha_x)} = 0.$$

Will man die Coefficienten $A_{\mu_x}^{(x)}$ in dem Falle einer vielfachen Nullstelle α_1 des Nenners

$$g_m = (x - \alpha_1)^{m_1} g_{m-m_1}$$

in analoger Weise bestimmen, so gehe man von der Zerlegung

$$\frac{f_n(x)}{g_m(x)} = p_{n-m}(x) + \frac{q_{m_1-1}(x)}{(x - \alpha_1)^{m_1}} + \frac{Q_1(x)}{g_{m-m_1}(x)}$$

oder

$$\frac{f(x)}{g(x)} = \frac{A_1^{(1)}}{x - \alpha_1} + \frac{A_2^{(1)}}{(x - \alpha_1)^2} + \dots + \frac{A_{m_1}^{(1)}}{(x - \alpha_1)^{m_1}} + \frac{(x - \alpha_1)^{m_1} P_1(x)}{g(x)},$$

aus, multiplicire diese Gleichung mit $g(x)$, setze dann:

$$g(x) = (x - \alpha_1)^{m_1} \frac{g^{(m_1)}(\alpha_1)}{m_1!} + (x - \alpha_1)^{m_1+1} \frac{g^{(m_1+1)}(\alpha_1)}{(m_1+1)!} + \dots + (x - \alpha_1)^n \frac{g^{(n)}(\alpha_1)}{n!}$$

$$f(x) = f(\alpha_1) + f'(\alpha_1) \frac{x - \alpha_1}{1} + \dots + f^{(n)}(\alpha_1) \frac{(x - \alpha_1)^n}{n!}$$

$$P_n(x) = P(\alpha_1) + P^{(1)}(\alpha_1) \frac{x - \alpha_1}{1} + \dots + P^{(n)}(\alpha_1) \frac{(x - \alpha_1)^n}{n!},$$

wobei angenommen ist, daß $f(x)$ nicht die Nullstelle α_1 besitzt, und vergleiche dann die beiden Seiten der nach Potenzen von $(x - \alpha_1) = h$, zu ordnenden Gleichung. Es folgt die Reihe von Beziehungen:

$$A_{m_1}^{(1)} \frac{g^{(m_1)}(\alpha_1)}{m_1!} = f(\alpha_1)$$

$$A_{m_1-1}^{(1)} \frac{g^{(m_1)}(\alpha_1)}{m_1!} + A_{m_1}^{(1)} \frac{g^{(m_1+1)}(\alpha_1)}{(m_1+1)!} = \frac{f'(\alpha_1)}{1}$$

$$\dots \dots \dots$$

$$A_1^{(1)} \frac{g^{(m_1)}(\alpha_1)}{m_1!} + A_2^{(1)} \frac{g^{(m_1+1)}(\alpha_1)}{(m_1+1)!} + \dots + A_{m_1}^{(1)} \frac{g^{(2m_1-1)}(\alpha_1)}{(2m_1-1)!} = \frac{f^{(m_1-1)}(\alpha_1)}{(m_1-1)!},$$

aus denen die Werthe von $A_{\mu_1}^{(1)}$ successive zu entnehmen sind. Man sieht unmittelbar, daß alle Coefficienten $A_{\mu_1}^{(1)}$ verschwinden, wenn $f(x)$ die m_1 fache Nullstelle α_1 besitzt, und das sollte natürlich eintreffen.

Da die m_1 Coefficienten $A_{\mu_1}^{(1)}$ hier durch die $2m_1$ Größen $g^{(\mu_1)}(\alpha_1)$ und $f^{(\mu_1)}(\alpha_1)$ und somit alle Coefficienten $A_{\mu_n}^{(x)}$ durch $2m$ Größen bestimmt sind, endlich die ganze rationale Function $p_{n-m} \quad n - m + 1$ Coefficienten enthält, muß die rationale Function $\frac{f_n}{g_m} \quad n + m + 1$ constante Größen besitzen, und man wird dieselbe angeben können, wenn ihre Werthe an $n + m + 1$ Stellen

$$x = \xi_0, \xi_1, \dots, \xi_m, \xi_{m+1}, \dots, \xi_{m+n}$$

vorgegeben sind. Die zugehörigen Werthe heißen

$$\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_m, \eta_{m+1}, \dots, \eta_{m+n}.$$

Gäbe es zwei Functionen $\frac{f_n}{g_m}, \frac{F_n}{G_m}$ der verlangten Art, so müßte die Gleichung

$$f_n G_m - F_n g_m = 0$$

$(n + m)^{\text{ten}}$ Grades $(n + m + 1)$ Wurzeln ξ haben; das geht nicht an, folglich ist die Forderung eine bestimmte und es fragt sich nur, wie die arithmetische Abhängigkeit der rationalen Function von dem Werthe der Variabeln ausfallen muß, damit die Function den Anforderungen genügt.

Setzt man zunächst voraus, daß n der Werthe η etwa $\eta_{m+\nu}$ ($\nu = 1, 2, \dots, n$) Null sind, dann besitzt der Zähler f_n die Gestalt:

$$a \prod_{\nu=1}^n (x - \xi_{m+\nu}),$$

wo a vorderhand willkürlich ist. — Die Function g_m muß für $x = \xi_\mu$ ($\mu = 0, 1, 2, \dots m$) den Werth

$$\frac{a}{\eta_\mu} \prod_{\nu=1}^n (\xi_\mu - \xi_{m+\nu}) = \xi_\mu$$

annehmen, sonst könnte $\frac{f_n(\xi_\mu)}{g_m(\xi_\mu)}$ nicht gleich η_μ werden.

Bezeichnet man

$$\prod_{\mu=0}^m (x - \xi_\mu) = \varphi(x),$$

so wird der Nenner nach der Lagrange'schen Formel gleich

$$\sum_{\mu=1}^m \xi_\mu \frac{\varphi'(x)}{\varphi'(\xi_\mu) (x - \xi_\mu)}$$

zu setzen sein.

Die Function $\frac{f_n}{g_m}$, welche an den Stellen

ξ_μ ($\mu = 0, 1, \dots m$) die Werthe η_μ ,

an den Stellen $\xi_{m+\nu}$ ($\nu = 1, 2, \dots n$) den Werth Null annimmt, erhält dann die Gestalt:

$$\frac{a \prod_{\nu=1}^n (x - \xi_{m+\nu})}{\sum_{\mu=0}^m \left(\frac{\varphi(x)}{x - \xi_\mu} \cdot \frac{\prod_{\nu=1}^n (\xi_\mu - \xi_{m+\nu})}{\eta_\mu \varphi'(\xi_\mu)} \right)}$$

Gibt man der willkürlichen Constanten a den Werth

$$\frac{\eta_0 \eta_1 \dots \eta_m}{\prod_{\nu} (\xi_0 - \xi_{m+\nu}) \cdot \prod_{\nu} (\xi_1 - \xi_{m+\nu}) \dots \prod_{\nu} (\xi_m - \xi_{m+\nu})} = \frac{\eta_0 \eta_1 \dots \eta_m}{\prod_{\mu, \nu} (\xi_\mu - \xi_{m+\nu})}$$

und bildet darauf die Summe aller aus dem Zähler $a \prod_{\nu} (x - \xi_{m+\nu})$

und ebenso die Summe aller aus dem obigen Nenner durch Permutation der Indices

$0, 1, 2, \dots m, m+1, \dots m+n$

entstehenden Ausdrücke, so ist der Quotient derselben die ursprünglich verlangte Function $\frac{f_n}{g_m}$. *)

*) Die Lösung der letzten Aufgabe stammt von Cauchy her.

Drittes Capitel.

I. Abschnitt.

Potenzreihen einer und mehrerer Variabeln.

§ 26. Gleichmäßige Convergenz.

Wie wir das System rationaler Zahlengrößen verwandten, um die allgemeineren irrationalen Größen zu definiren, wollen wir die rationalen (ganzen und gebrochenen) Functionen zur Bildung neuer mit den Variabeln veränderlicher Größen benützen.

Verknüpft man rationale Functionen eine endliche Anzahl Male durch die elementaren Rechnungsoperationen, so entstehen immer wieder rationale Functionen. Um etwas Neues zu Tage zu fördern, müssen wir eine unendliche Anzahl rationaler Functionen

$$f_1(x), f_2(x), \dots f_v(x), \dots$$

vorlegen und diese verknüpfen, etwa durch Summation. Wir stellen uns also geradezu die Aufgabe, die Summe unendlich vieler rationaler Functionen

$$\sum_{v=1}^{\infty} f_v(x) = F(x)$$

zu untersuchen.

Die nothwendige und hinreichende Bedingung dafür, daß diese Summe an einer Stelle $x = x_0$ eine bestimmte (von der Anordnung der Summanden unabhängige) Bedeutung habe, besteht in der Convergenz der Reihe der absoluten Beträge:

$$\sum_{v=1}^{\infty} |f_v(x_0)|,$$

denn dann kann man nach Annahme einer beliebig kleinen Größe δ stets ein solches $v = n$ ausfindig machen, daß der absolute Betrag jeder Differenz

$$\left| \sum_{v=1}^{\infty} f_v(x_0) - \sum_{v=1}^m f_v(x_0) \right| < \delta,$$

sobald nur $m \geq n$ ist.

Damit die durch die Summe definirte GröÙe $F(x)$ die rationale Function umfasse oder nur irgend etwas mit der rationalen Function gemein habe, müssen wir voraussetzen, daß die Summe nicht bloß für einzelne Werthe der Variabeln, sondern für alle Stellen eines wenn auch noch so kleinen Bereiches in der Umgebung einer ersten Stelle x_0 absolut und somit auch unbedingt convergirt.

Soll die unendliche Reihe in einem Bereiche unabhängig von der Anordnung ihrer Glieder f_v d. h. unbedingt convergiren, so muß man nach Annahme einer GröÙe δ eine ~~un~~endliche Anzahl von Gliedern derart abtrennen können, daß der absolute Betrag der Summe von beliebig vielen der übrig bleibenden Glieder für jeden Werth von x aus dem Bereiche um x_0 kleiner ist als δ . Diese Bedingung wird offenbar erfüllt sein, sobald man eine Reihe solcher positiver GröÙen

$$\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_v, \dots$$

von endlicher Summe angeben kann, daß für jeden der in Rede stehenden Variablenwerthe

$$|f_v| \leq \alpha_v \quad (v = 1, 2 \dots).$$

Die Gesammtheit der Stellen x_0 , für welche die Convergenzbedingung erfüllt ist, constituirt den *Convergenzbereich der Summe*. Dieser Bereich besteht nothwendig aus einem oder mehreren von einander getrennten zweifach ausgedehnten Bereichen und jeder bildet ein zusammenhängendes Continuum.

Ob der Convergenzbereich einer Summe rationaler Functionen stets begrenzt sein muß, ob er sich *in das Unendliche erstrecken* d. h. die Umgebung der *unendlich fernen* Stelle $x = \infty$ enthalten kann, werden wir zu untersuchen haben; hier mag nur hervorgehoben werden, daß der Convergenzbereich der Summe einer endlichen Anzahl ganzer rationaler Functionen durch die Stelle ∞ , der der Summe einer endlichen Anzahl echt gebrochener rationaler Functionen durch die Nullstellen der Nenner begrenzt ist, indem die einzelne dieser Functionen an den Stellen, wo der Nenner verschwindet, unendlich wird, und an der unendlich fernen Stelle das einzelne Glied der Partialbruchzerlegung

$$\frac{A}{(x - \alpha)^m}$$

Null ist, weil der absolute Betrag dort verschwindet. —

Man sieht leicht, daß die Summe $\sum f_v(x)$, welche einen Convergenzbereich besitzt, keineswegs eine stetig veränderliche GröÙe $y = F(x)$ definiren muß; denn wenn $F(x)$ an einer Stelle x_0 des Convergenzbereiches stetig sein soll, so muß man nach Annahme einer willkürlich kleinen GröÙe δ eine Umgebung ϱ von x_0 angeben können, daß für alle der Bedingung

$$|x - x_0| < \varrho$$

genügenden Stellen x der absolute Betrag

$$|F(x) - F(x_0)|$$

oder

$$|(f_1(x) - f_1(x_0)) + (f_2(x) - f_2(x_0)) + \dots|$$

kleiner wird als δ und diese Bedingung braucht nicht erfüllt zu sein. Wenngleich der absolute Betrag jeder einzelnen Differenz $(f_v(x) - f_v(x_0))$ beliebig klein gemacht werden kann, ist durchaus noch nicht nothwendig, daß der absolute Betrag der Summe unendlich vieler beliebig kleiner Größen δ , endlich oder gar kleiner wird als δ .

Denkt man nach Fixirung eines endlichen Convergencebereiches unserer Summe in jedem Punkte des Inneren und der Begrenzung ein Loth auf die Ebene der Variablen x errichtet und darauf eine Strecke abgetragen, die als Maafs des absoluten Betrages $\left| \sum_v f_v(x_0) \right|$ anzusehen ist, so kann es möglich sein, daß um den Endpunkt jedes Lothes eine Kugel zu legen ist, welche keinen anderen Endpunkt enthält. Dieses Bild veranschaulicht, welche grofse Regellosigkeit in den Werthen $\sum_v f_v(x)$ selbst dann zurückbleibt, wenn wir annehmen, daß ein Convergencebereich existirt.

Wir wollen die Convergence der Summe $\sum_v f_v(x)$ so beschränken, daß die durch dieselbe definirte Gröfse $F(x)$ ebenso wie die rationale Function stetig wird. Wir setzen fest:

Die unendliche Reihe $\sum_v f_v(x)$ convergire in einem Bereiche

(A) derart, daß sich nach Annahme einer willkürlich kleinen positiven Gröfse δ eine ganze Zahl m so bestimmen läfst, daß der absolute Betrag der Summe

$$\sum_{v=n}^{\infty} f_v(x)$$

für jeden Werth von $n \geq m$ und jede Stelle x des Bereiches kleiner wird als δ . Dann heiße die Reihe in dem Bereiche (A) *gleichmäfsig convergent*.*)

So ist z. B. die Reihe

$$\sum_{v=0}^{\infty} x^v$$

in dem durch die Bedingungen

$$|x| = \xi < 1$$

*) Weierstrafs, Abhandlungen aus der Functionenlehre S. 70.

definierten Bereiche gleichmäßig convergent, denn man kann eine ganze Zahl m so bestimmen, daß

$$|x^n + x^{n+1} + \dots| \leq \xi^n + \xi^{n+1} + \dots = \xi^n \frac{1}{1-\xi}$$

für jedes $n \geq m$ und jede der genannten Stellen kleiner wird als eine beliebig kleine GröÙe δ .

Offenbar liegt in dieser Definition der gleichmäßig convergenten Reihe nichts, woraus man schließen könnte, die Reihe sei auch unbedingt convergent. Nehmen wir daher nur an, daß die bestimmte Reihe

$$f_1(x) + f_2(x) + \dots + f_r(x) + \dots$$

bei der angegebenen Gliederfolge für $x = a$ convergirt, so kann man möglicherweise der Stelle $x = a$ eine solche Umgebung r zuordnen, daß die Reihe für alle der Bedingung $|x - a| \leq r$ genügenden Werthe gleichmäßig convergirt und man sagt dann, *die Reihe convergirt in der Nähe von a gleichmäßig*.

Die für die Art der gleichmäßigen Convergenz charakteristische ganze Zahl m ist auch als obere Grenze derjenigen Werthe zu deuten, welche sich ergeben, indem man für die in Rede stehenden Stellen x' Zahlen m' sucht, bei denen

$$\left| \sum_1^{\infty} f_r(x') - \sum_1^{n'} f_r(x') \right| < \delta$$

wird, sobald $n' \geq m'$ ist. — Ist die obere Grenze nicht endlich, so kann zwar die Reihe an jeder einzelnen Stelle convergiren, sie convergirt aber nicht gleichmäßig in dem durch die Gesamtheit der Stellen constituirten Bereiche.

Die Umgebungen jeder einzelnen Stelle a , in deren Nähe die Reihe gleichmäßig convergirt, haben eine obere Grenze R . Die Gesamtheit der durch die Bedingung

$$|x - a| < R$$

gekennzeichneten Stellen nennt man kurzweg die *Umgebung* von (a) . Geht man von dieser aus, so gelangt man — den Begriff der Umgebung in diesem Sinne nehmend — auf bekannte Weise zu einem Continuum von Stellen, in deren Nähe die Reihe gleichmäßig convergirt, dem *Bereiche gleichmäßiger Convergenz*.

Weiß man, daß eine Reihe in der Nähe jeder Stelle gleichmäßig convergirt, die im Innern oder auf der Begrenzung eines Continuum liegt, so convergirt sie auch in dem ganzen Bereiche gleichmäßig.

Dieser Satz ist gerade so zu beweisen, wie der bereits erledigte Satz: *eine an jeder Stelle eines Continuum stetig veränderliche GröÙe ist in dem ganzen Continuum stetig*, und darum unterdrücken wir hier den Beweis. Es soll nur bemerkt werden, daß der Radius der Um-

gebung einer der Umgebung R von a angehörigen Stelle b innerhalb der Grenzen liegt

$$R - d \quad \text{und} \quad R + d,$$

wo $d = |b - a|$ ist.

Jetzt behaupten wir, daß die Summe einer Reihe innerhalb ihres Bereiches gleichmäßiger Convergenz eine stetig veränderliche Gröfse ist.

In der That: ist a eine Stelle, in deren Nähe die Reihe $\sum_{v=1}^{\infty} f_v(x)$ gleichmäßig convergirt, und ist δ eine beliebig kleine positive Gröfse, die wir in die Summe von δ_1 und δ_2 zerlegt denken, so kann man eine ganze Zahl m derart angeben, daß in gewisser Nähe von a der absolute Betrag von

$$\sum_{v=n}^{\infty} f_v(x)$$

kleiner wird als eine Gröfse ε , sobald $n \geq m$ ist, und

$$\left| \sum_{v=n}^{\infty} (f_v(x) - f_v(a)) \right| < \left| \sum_{v=n}^{\infty} f_v(x) \right| + \left| \sum_{v=n}^{\infty} f_v(a) \right| < \delta,$$

wird. Wählt man dann noch eine Umgebung von a so klein, daß auch

$$\left| \sum_{v=1}^n (f_v(x) - f_v(a)) \right| < \delta,$$

wird, so ist die für die Stetigkeit von $F(x)$ an der Stelle a notwendige Bedingung

$$|F(x) - F(a)| < \delta$$

erfüllt und die Behauptung erwiesen.

Von einer unendlichen Reihe rationaler Functionen mehrerer Variabeln

$$\sum_{v=1}^{\infty} f_v(x_1, x_2, \dots, x_n) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

sagt man ebenfalls, sie convergirt in einem $2n$ -fach ausgedehnten zusammenhängenden Bereiche gleichmäßig, wenn man nach Annahme einer beliebig kleinen Gröfse δ eine ganze Zahl m so angeben kann, daß der absolute Betrag der Summe

$$\sum_{v=n}^{\infty} f_v(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

für jede dem Bereiche angehörige Stelle (x) kleiner ist als δ , sobald $n \geq m$ ist.

Convergirt die Reihe in der Nähe einer Stelle (x) gleichmäßig, so kann man, von diesem Bereiche ausgehend, ein $2n$ -fach ausgedehntes Continuum von Stellen finden, in deren Nähe die Reihe gleichmäßig

convergiert. In diesem Bereiche gleichmäßiger Convergenz ist die durch die unendliche Reihe definirte GröÙe wieder stetig, denn man kann einer Stelle (a) dieses Bereiches eine solche Umgebung (δ) zuordnen, daß für jede Stelle ($a + h$), wo

$$|h_v| < \delta, \quad (v = 1, 2 \dots n),$$

der absolute Betrag der Differenz

$$F(a_1 + h_1, a_2 + h_2, \dots a_n + h_n) - F(a_1, a_2, \dots a_n)$$

kleiner wird als eine beliebig kleine vorgegebene GröÙe.

§ 27. Potenzreihen.

Wir beschäftigen uns nunmehr mit den aus unendlich vielen ganzen rationalen Functionen einer oder mehrerer Variabeln:

$f_v(x) = a_v x^v$, $f_{\mu_1, \mu_2 \dots \mu_n}(x_1, x_2 \dots x_n) = a_{\mu_1, \mu_2 \dots \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n}$ gebildeten Reihen:

$$\sum_{v=0}^{\infty} a_v x^v, \quad \sum_{(\mu_v)=0}^{\infty} a_{\mu_1, \mu_2 \dots \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n}, \quad *)$$

die nach ganzen positiven Potenzen fortschreitende *Potenzreihen* heißen, und mit

$$\mathfrak{P}(x), \quad \mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n)$$

bezeichnet werden sollen.

Soll die unendliche Potenzreihe an einer Stelle a oder (a) einen von der Summationsfolge unabhängigen endlichen Werth besitzen, so muß die Summe der absoluten Beträge der einzelnen Glieder an der genannten Stelle convergiren. Wenn diese Summe für das Werthesystem $x = a$ respective $x_v = a_v$ ($v = 1, 2, \dots n$) nicht endlich ist, kann die Summe umsoweniger an einer Stelle convergiren, für die

$$|x| > |a| \quad \text{oder} \quad |x_v| > |a_v| \quad (v = 1, 2 \dots n)$$

ist. Wenn aber in der Potenzreihe $\mathfrak{P}(x)$ der absolute Betrag jedes Gliedes $|a_v x^v|$ für einen Werth von x mit dem Betrage ξ_0 endlich und deshalb kleiner bleibt als eine positive angebbare GröÙe g , so ist die Reihe für alle der Bedingung

$$|x| = \xi < \xi_0$$

genügenden Werthe absolut und gleichmäßig convergent.

Der Voraussetzung zufolge ist

$$|a_v x^v| = |a_v| \xi_0^v < g,$$

und daher

$$|a_v x^v| = |a_v| \xi^v < g \left(\frac{\xi}{\xi_0} \right)^v.$$

*) Wo $(\mu_v) = 0$ anstatt $\mu_1, \mu_2, \dots \mu_n = 0$ geschrieben ist.

Weil dann

$$|\mathfrak{P}(x)| \leq \sum_{v=0}^{\infty} |a_v| \xi^v < g \sum_{v=0}^{\infty} \left(\frac{\xi}{\xi_0}\right)^v = g \frac{1}{1 - \frac{\xi}{\xi_0}},$$

und hierin $\frac{\xi}{\xi_0} < 1$ ist, bleibt der absolute Betrag der Potenzreihe und die Reihe der absoluten Beträge der Glieder $a_v x^v$ endlich, welches auch der Werth von $|x| = \xi < \xi_0$ sei.

Die Potenzreihe ist in dem durch die Bedingung $|x| < \xi_0$ definirten Bereiche auch gleichmäßig convergent. Denn wenn eine beliebig kleine GröÙe δ vorgegeben wird, so kann man immer eine ganze Zahl m so bestimmen, daß

$$\left| \sum_{v=n}^{\infty} a_v x^v \right| < \delta \quad (n \geq m),$$

indem in der Ungleichung:

$$\left| \sum_{v=n}^{\infty} a_v x^v \right| \leq \sum_{v=n}^{\infty} |a_v x^v| < g \left(\frac{\xi}{\xi_0}\right)^n \frac{1}{1 - \frac{\xi}{\xi_0}}$$

die rechte Seite durch passende Wahl von n der Forderung gemäß beliebig klein zu machen ist.

Die *Potenzreihe* $\mathfrak{P}(x)$ ist als gleichmäßig convergente Reihe in dem *Convergenzbereiche stetig*.

Ertheilt man x einen besonderen Werth x_0 , so sind durch die absoluten Beträge

$$|a_v x_0^v| \quad (v = 0, 1, 2 \dots)$$

unendlich viele positive GröÙen definirt, welche eine obere Grenze besitzen. Ist diese Grenze endlich, so convergirt die Reihe für jedes x , welches der Bedingung $|x| < |x_0| = \xi_0$ genügt. Nun sind auch unendlich viele GröÙen ξ_0 definirt, die selbst eine obere Grenze R haben, und solange $|x| < R$, convergirt die Reihe. Ist aber $|x| > R$, so divergirt die Potenzreihe, denn dann werden einzelne Glieder unendlich groß. Für die durch die Bedingung $|x| = R$ charakterisirten Stellen kann die Reihe durchweg convergiren, oder divergiren, oder an einzelnen Stellen divergiren und an anderen convergiren, darüber kann man hier nicht entscheiden.

Der Convergenzbereich der Potenzreihe $\mathfrak{P}(x)$ ist darnach in der Ebene der Variablen durch eine *Kreisfläche* mit dem Radius R um die Stelle $x = 0$ repräsentirt, und R heißt der *Convergenzradius*.

Für die Potenzreihe $\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n)$ bestehen analoge Sätze.

Kann man solche Werthe $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots x_n^{(0)}$ mit den absoluten Beträgen $\xi_1^{(0)}, \xi_2^{(0)}, \dots \xi_n^{(0)}$ angeben, daß der absolute Betrag jedes Gliedes der Reihe für dieses Werthesystem kleiner bleibt als eine

angebbare Gröfse g , so convergirt die Reihe für alle durch die Bedingungen

$$\xi_\nu = |x_\nu| < \xi_\nu^{(0)} \quad (\nu = 1, 2 \dots n)$$

bestimmten Werthesysteme (x) absolut und gleichmäfsig.

Für solche Werthesysteme ist wieder:

$$|a_{\mu_1, \mu_2 \dots \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n}| < g \left(\frac{\xi_1}{\xi_1^{(0)}} \right)^{\mu_1} \left(\frac{\xi_2}{\xi_2^{(0)}} \right)^{\mu_2} \dots \left(\frac{\xi_n}{\xi_n^{(0)}} \right)^{\mu_n},$$

und deshalb

$$\begin{aligned} & |\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n)| \leq \\ & \leq \sum_{(\mu_\nu)=0}^{\infty} |a_{\mu_1, \mu_2 \dots \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n}| < g \sum_{(\mu_\nu)=0}^{\infty} \left(\frac{\xi_1}{\xi_1^{(0)}} \right)^{\mu_1} \left(\frac{\xi_2}{\xi_2^{(0)}} \right)^{\mu_2} \dots \left(\frac{\xi_n}{\xi_n^{(0)}} \right)^{\mu_n} \\ & = g \frac{1}{\left(1 - \frac{\xi_1}{\xi_1^{(0)}}\right) \left(1 - \frac{\xi_2}{\xi_2^{(0)}}\right) \dots \left(1 - \frac{\xi_n}{\xi_n^{(0)}}\right)} \cdot *) \end{aligned}$$

Die Reihe $\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ convergirt in der Umgebung $(\xi^{(0)})$ der Stelle (0) unbedingt, denn die rechte Seite unserer Ungleichung bleibt daselbst endlich, sie convergirt aber auch gleichmäfsig, da man stets solche ganze Zahlen m_1, m_2, \dots, m_n finden kann, daß der absolute Betrag der Reihe

$$\sum_{(\mu_\nu)=(n_\nu)}^{\infty} a_{\mu_1, \mu_2 \dots \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n},$$

der ja kleiner ist als

$$g \left(\frac{\xi_1}{\xi_1^{(0)}} \right)^{n_1} \left(\frac{\xi_2}{\xi_2^{(0)}} \right)^{n_2} \dots \left(\frac{\xi_n}{\xi_n^{(0)}} \right)^{n_n} \frac{1}{\left(1 - \frac{\xi_1}{\xi_1^{(0)}}\right) \left(1 - \frac{\xi_2}{\xi_2^{(0)}}\right) \dots \left(1 - \frac{\xi_n}{\xi_n^{(0)}}\right)},$$

an jeder Stelle der genannten Umgebung von (0) kleiner gemacht werden kann, als eine beliebig kleine vorgegebene Gröfse δ , sobald nur $n_1 \geq m_1, n_2 \geq m_2, \dots, n_n \geq m_n$. Dann ist es aber ein Leichtes, gerade die Bedingung erfüllt zu sehen, welche die Definition der gleichmäfsigen Convergenz vorschreibt, wenn man nur m die grösste der Zahlen m_ν nennt.

Um eine Zahl m der verlangten Art ausfindig zu machen, denke man die kleinste der positiven Gröfsen $\xi_1^{(0)}, \xi_2^{(0)} \dots \xi_m^{(0)}$ ausgewählt, — sie heiße $\xi^{(0)}$ — dann wird die gegebene Reihe an allen Stellen (x) ; für welche

*) Die hier angeschriebene Gleichheit können wir leicht bestätigen, da wir wissen, wie man die für $\frac{1}{1 - \frac{\xi_\nu}{\xi_\nu^{(0)}}}$ ($\nu = 1, 2 \dots n$) zu setzenden unendlichen Reihen mit einander multiplicirt.

$$|x_\nu| < \xi^{(0)}, \quad (\nu = 1, 2 \dots n)$$

absolut convergiren und man darf die Reihe nach den Gliedern gleicher Dimension $\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n = \mu$ ordnen. Ersetzt man hierauf

$$x_\nu \text{ durch } c_\nu x, \quad (\nu = 1, 2 \dots n),$$

wo die von Null verschiedenen Gröfsen c_ν nur die Bedingung zu erfüllen haben, daß nach der Substitution die Coefficienten der Potenzen von x nicht alle verschwinden, so erhält man eine Reihe:

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} A_\mu x^\mu$$

und für diese suche man ein m so, daß für alle Stellen der kleinsten der Umgebungen $\frac{\xi^{(0)}}{|c_\nu|}$ der absolute Betrag jeder Summe

$$\sum_{\mu=m}^{\infty} A_\mu x^\mu \quad (m' \geq m)$$

kleiner wird als δ . — Dann ist die Zahl m eine der verlangten Art.

Ist $\xi^{(0)}$ die kleinste der Gröfsen $\xi_1^{(0)}, \xi_2^{(0)} \dots \xi_n^{(0)}$ und R ihre obere Grenze, so convergirt die Potenzreihe für alle Stellen des Bereiches

$$|x_\nu| < R \quad (\nu = 1, 2, \dots n).$$

Die Reihe convergirt möglicherweise auch für Werthesysteme

$$(x_1, x_2, \dots x_n),$$

für die

$$|x_1| > R, |x_2| > R, \dots |x_{n-1}| > R, \text{ aber } |x_n| < R.$$

Wir schenken aber der eben definirten Gröfse R unsere Aufmerksamkeit, weil wir gerade diese den Convergenzradius nennen können und damit eine Bestimmtheit der Ausdrucksweise erzielen, wie bei der Potenzreihe einer Variablen.

§ 28. Der wahre Convergenzradius einer Potenzreihe einer Variablen.

Wir kehren zu den Potenzreihen $\mathfrak{P}(x) = \sum_{\nu=0}^{\infty} a_\nu x^\nu$ zurück und bemerken, wenn der absolute Betrag des Quotienten der Coefficienten aufeinanderfolgender Glieder $\left| \frac{a_\nu}{a_{\nu+1}} \right|$ stets größer ist als eine noch so kleine aber endliche Gröfse r , so ist die Potenzreihe mindestens solange convergent als $|x| < r$ ist.

Es folgt aus den Ungleichungen:

$$\left| \frac{a_1}{a_0} \right| < \frac{1}{r}, \quad \left| \frac{a_2}{a_1} \right| < \frac{1}{r}, \quad \dots \left| \frac{a_\nu}{a_{\nu-1}} \right| < \frac{1}{r}, \quad \dots$$

durch Multiplication

$$\left| \frac{a_\nu}{a_0} \right| < \frac{1}{r^\nu} \quad \text{oder} \quad |a_\nu| r^\nu < |a_0|$$

für jedes ν , d. h. der absolute Betrag jedes Gliedes $a_\nu x^\nu$ bleibt kleiner als die endliche GröÙe $|a_0|$, wenn nur $|x| \leq r$ ist, aber dann convergirt die Reihe für alle Werthe des durch die Bedingung $|x| < r$ bestimmten Bereiches.

Der so gefundene Convergencebereich braucht nicht der „wahre“ zu sein, d. h. derjenige, welcher das Gebiet der Stellen, wo $\mathfrak{P}(x)$ endlich ist, von dem Gebiete trennt, wo die Potenzreihe divergirt.

Die Existenz dieses wahren Convergencekreises ist uns zwar schon klar, doch wollen wir einen Beweis für dieselben erbringen. Wir behaupten also:

Wenn eine Potenzreihe $\mathfrak{P}(x)$ für gewisse Stellen endlich und für andere in gröÙerer Entfernung von der Stelle $x = 0$ nicht endlich ist, dann gibt es einen wahren Convergencekreis.

Der Voraussetzung nach findet sich in der Reihe von Werthen:

$$\mathfrak{P}(0), \mathfrak{P}(1), \mathfrak{P}(2) \dots \mathfrak{P}(n) \dots$$

ein erster nicht endlicher z. B. $\mathfrak{P}(n+1)$, dann gibt es in der neuen Werthereihe

$$\mathfrak{P}(n), \mathfrak{P}\left(n + \frac{1}{m}\right), \mathfrak{P}\left(n + \frac{2}{m}\right), \dots \mathfrak{P}\left(n + \frac{m-1}{m}\right), \mathfrak{P}(n+1)$$

wieder einen letzten endlichen Werth, er heiÙe $\mathfrak{P}\left(n + \frac{m_1}{m}\right)$. Bestimmen wir ferner einen letzten Werth:

$$n + \frac{m_1}{m} + \frac{m_2}{m^2},$$

für welchen $\mathfrak{P}(x)$ endlich ist, fahren so fort und nehmen gleich an, daÙ wir durch eine endliche Anzahl von Successionen nicht zu dem wahren Convergenceradius gelangen, so haben wir eine GröÙe

$$R = n + \frac{m_1}{m} + \frac{m_2}{m^2} + \frac{m_3}{m^3} + \dots$$

definiert, die wegen der Beziehungen

$$\frac{m_1}{m} < 1, \quad \frac{m_2}{m^2} < \frac{1}{m}, \quad \frac{m_3}{m^3} < \frac{1}{m^2}, \quad + \dots$$

und der Ungleichung

$$R < n + 1 + \frac{1}{m} + \frac{1}{m^2} + \dots = n + \frac{1}{1 - \frac{1}{m}}$$

mit n endlich ist. Diese GröÙe ist der wahre Convergenceradius, denn nach Annahme einer willkürlich kleinen GröÙe δ kann man stets eine ganze Zahl ν so bestimmen, daÙ

$$R - \left(n + \frac{m_1}{m} + \frac{m_2}{m^2} + \dots + \frac{m_\nu}{m^\nu} \right) < \frac{1}{m^{\nu+1}} \frac{1}{1 - \frac{1}{m}} < \delta$$

wird, und

$$\mathfrak{P} \left(n + \frac{m_1}{m} + \frac{m_2}{m^2} + \dots + \frac{m_\nu}{m^\nu} \right)$$

ist noch endlich, aber für eine positive Gröfse $x = R' > R$ kann die Potenzreihe nicht mehr convergiren. Man kann zwar die ganze Zahl ν noch so wählen, daß

$$R + \frac{1}{m^\nu} < R'$$

bleibt, aber der Definition von R zufolge kann $\mathfrak{P} \left(R + \frac{1}{m^\nu} \right)$ nicht endlich sein.

Der Kreis mit dem Radius R um die Stelle $x = 0$ hat demnach die Eigenschaft des wahren Convergenzkreises.

Eine Potenzreihe kann entweder für jeden endlichen Werth der Variablen oder *beständig* convergiren, dann ist der wahre Convergenzradius unendlich, oder sie hat nur einen unendlichen Convergenzbereich um die Stelle Null (der wahre Convergenzradius ist endlich), und schließlic kann sie den Convergenzradius Null haben, wie z. B. die Reihe

$$\mathfrak{P}(x) = \sum_{n=0}^{\infty} n! x^n = 1 + x + 2! x^2 + 3! x^3 + \dots$$

Wie klein man hier auch $|x|$ annehmen mag, die Werthe $|n! x^n|$ wachsen mit n ins Unendliche und der Quotient $\frac{n!}{(n-1)!}$ ebenso, daher ist R und natürlich auch r Null.

Die Reihe

$$1 + \frac{x}{1} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

convergirt jedenfalls für die Werthe x , deren absoluter Betrag kleiner ist als 1, denn der Quotient

$$\left(\frac{1}{n!} \right) : \left(\frac{1}{(n+1)!} \right) = n + 1 \quad (n = 0, 1, 2 \dots)$$

hat den kleinsten Werth 1. Der wahre Convergenzradius R ist aber größer als $r = 1$, und zwar unendlich, denn wie groß man auch $|x| = \xi$ wählen mag, der absolute Betrag der einzelnen Glieder bleibt unter einer angebbaren Gröfse g . Man kann ja zu jedem endlichen Werthe ξ ein n so bestimmen, daß

$$n \geq \xi > n - 1,$$

und dann bleibt der absolute Betrag jedes auf das n^{te} folgenden Gliedes

$$\leq \frac{\xi^{n-1}}{(n-1)!}.$$

Die Reihe

$$1 + x + x^2 + \dots + x^r + \dots$$

besitzt den endlichen Convergenzradius $R = r = 1$.

§ 29. Ein Satz über die Coefficienten der Potenzreihen.

Wir haben jetzt einen Satz zu beweisen, der uns einen richtigen Aufschluss über die Coefficienten convergenter Potenzreihen geben wird.*)

Sind in der rationalen Function

$$f(x) = a_0 + a_1 x^{m_1} + a_2 x^{m_2} + \dots + a_r x^{m_r},$$

die Exponenten $m_1, m_2 \dots m_r$ positive und negative ganze Zahlen, und bezeichnet g die obere Grenze der Werthe von $|f(x)|$ für alle Werthe x mit dem absoluten Betrage ξ , so hat g den Werth $|a_0|$ zur unteren Grenze.

Versteht man unter Θ eine Gröfse von dem absoluten Betrage 1, die aber keiner der Gleichungen

$$y^{m_\varrho} = 1 \quad (\varrho = 1, 2 \dots r)$$

genügt — und solcher Gröfsen gibt es unendlich viele, da wir nur eine endliche Anzahl von Werthen ausgeschlossen haben — und bildet man die Ausdrücke:

$$\begin{aligned} f(\xi) &= a_0 + a_1 \xi^{m_1} + a_2 \xi^{m_2} + \dots + a_r \xi^{m_r} \\ f(\xi \Theta) &= a_0 + a_1 \xi^{m_1} \Theta^{m_1} + a_2 \xi^{m_2} \Theta^{m_2} + \dots + a_r \xi^{m_r} \Theta^{m_r} \\ f(\xi \Theta^2) &= a_0 + a_1 \xi^{m_1} \Theta^{2m_1} + a_2 \xi^{m_2} \Theta^{2m_2} + \dots + a_r \xi^{m_r} \Theta^{2m_r} \\ &\dots \dots \dots \end{aligned}$$

$$f(\xi \Theta^{n-1}) = a_0 + a_1 \xi^{m_1} \Theta^{(n-1)m_1} + a_2 \xi^{m_2} \Theta^{(n-1)m_2} + \dots + a_r \xi^{m_r} \Theta^{(n-1)m_r},$$

so wird die Summe dieser nach Division durch n

$$\frac{1}{n} \sum_{v=0}^{n-1} f(\Theta^v \xi) = a_0 + \frac{1}{n} \sum_{\varrho=1}^r a_\varrho \xi^{m_\varrho} \frac{1 - \Theta^{m_\varrho n}}{1 - \Theta^{m_\varrho}}.$$

Der absolute Betrag der linken und deshalb auch der absolute Betrag der rechten Seite ist nicht gröfser als die obere Grenze g . Rechts kann aber zufolge der Voraussetzung über die Gröfse Θ kein Summand über jede Grenze wachsen, und bei hinlänglich großem n wird der rechtsstehende Ausdruck von a_0 um eine beliebig kleine Gröfse δ_n abweichen; sein absoluter Betrag

$$|a_0 + \delta_n|$$

wird kleiner als g , oder höchstens gleich g .

Wäre nun $|a_0| > g$, so könnte man ein n so bestimmen, dafs auch

$$|a_0| - |\delta_n| > g$$

*) Siehe Pincherle S. 334 und Weierstraßs S. 93.

würde, aber dann müßte wegen der Ungleichung:

$$|a_0 + \delta_n| \geq |a_0| - |\delta_n|$$

auch

$$|a_0 + \delta_n| > g$$

sein. Das ist nicht der Fall, folglich wird in der That

$$|a_0| \leq g.$$

Ist hierauf die obere Grenze der Werthe einer convergenten Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x) = \sum_{r=0}^{\infty} a_r x^r$$

mit dem Convergenzradius R für diejenigen Werthe x , deren absoluter Betrag $|x| = \xi < R$ ist, gleich g , so genügt der absolute Betrag des Coefficienten a_r der Ungleichung oder Gleichung:

$$|a_r| \leq g \cdot \xi^{-r}.$$

Bildet man nämlich das Product:

$$x^{-r} \mathfrak{P}(x) = a_0 x^{-r} + a_1 x^{-r+1} + \dots + a_{r-1} x^{-1} + a_r + a_{r+1} x + a_{r+2} x^2 + \dots,$$

so kann man in der Reihe

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} a_{r+\mu} x^{\mu}$$

ein $\mu = m$ so angeben, daß der absolute Betrag

$$\left| \sum_{\mu=m+1}^{\infty} a_{r+\mu} x^{\mu} \right|$$

für die der Bedingung $|x| \leq \xi$ genügenden x Werthe kleiner wird als die beliebig kleine positive Gröfse ε . Ist dann δ eine Gröfse, deren absoluter Betrag $|\delta| < \varepsilon$ ist, so wird

$$g \xi^{-r} > |a_0 x^{-r} + a_1 x^{-r+1} + \dots + a_r + a_{r+1} x + \dots + a_{r+m} x^m + \delta|$$

und umsomehr

$$g \xi^{-r} + \varepsilon > \left| \sum_{\mu=-r}^m a_{r+\mu} x^{\mu} \right|.$$

Die obere Grenze der rechten Seite, wo $|x| = \xi$ zu setzen ist, wird nach dem früheren Satze niemals kleiner als $|a_r|$, daher ist

$$g \xi^{-r} + \varepsilon > |a_r|,$$

und weil ε willkürlich klein ist, gilt

$$|a_r| \leq g \xi^{-r} \quad \text{oder} \quad g \geq |a_r| \xi^r. \quad *)$$

Ist eine Potenzreihe mit negativen Potenzen

*) Man beachte, daß dieser Satz und der voranstehende Hilfssatz nur bewiesen werden kann, wenn wir complexe Variablen in Rechnung ziehen.

$$a_0 + a_{-1}x^{-1} + a_{-2}x^{-2} + \dots + a_{-r}x^{-r} + \dots = \sum_{r=0}^{\infty} a_{-r}x^{-r},$$

die wir am besten mit

$$\mathfrak{P}\left(\frac{1}{x}\right)$$

bezeichnen, vorgelegt, so lassen sich für diese die früheren Betrachtungen wiederholen, wenn man nur bemerkt, daß sie durch die Substitution

$$x = \frac{1}{y}$$

in eine Reihe $\mathfrak{P}(y)$ übergeht.

Wenn $\mathfrak{P}(y)$ in dem Bereiche $|y| < R$ um die Stelle $y = 0$ convergirt, so convergirt $\mathfrak{P}\left(\frac{1}{x}\right)$ außerhalb der um die Stelle $x = 0$ liegenden Kreisfläche mit dem Radius $\frac{1}{R} = R_1$, denn zu einer Stelle in dem ersten Bereiche gehört eine und nur eine Stelle des zweiten Bereiches und umgekehrt und die Grenzstellen $|y| = R$ haben ihre entsprechenden auf dem Kreise $|x| = \frac{1}{R}$.

Ist die obere Grenze der Werthe $|\mathfrak{P}(y)|$ für die der Bedingung $|y| = \eta < R$ genügenden y Werthe g , so gilt

$$|a_{-\mu}| < g\eta^{-\mu},$$

und wenn $|x| = \xi = \frac{1}{\eta}$ ist,

$$|a_{-\mu}| \leq g\xi^{\mu}.$$

Der Convergenzbereich einer aus unendlich vielen Gliedern mit positiven und negativen Potenzen gebildeten Reihe

$$P(x) = \sum_{r=-\infty}^{+\infty} a_r x^r = \frac{1}{x} \mathfrak{P}_1(x) + \mathfrak{P}_2\left(\frac{1}{x}\right)$$

kann nur ein *Kreisring*, d. h. ein durch die Bedingungen

$$R_2 < |x| < R_1$$

definirter Bereich sein, denn wenn die Reihen

$$\mathfrak{P}_1(x) = \sum_{r=0}^{\infty} a_r x^r, \quad \frac{1}{x} \mathfrak{P}_2\left(\frac{1}{x}\right) = \sum_{r=1}^{\infty} a_{-r} x^{-r}$$

für solche x Werthe convergiren, deren absoluter Betrag

$$|x| < R_1 \text{ respective } |x| > R_2$$

ist, kann die Summe nur in dem genannten Bereiche endlich sein.

Ist $R_2 > R_1$, d. h. enthält der Bereich, wo $|x| < R_1$ ist, keine Stelle, welche außerhalb der Umgebung R_2 der Stelle Null liegt, so convergirt die Reihe $P(x)$ nirgends und ist $R_1 = R_2$, so kann $P(x)$ höchstens an Stellen des Kreises $|x| = R_1$ convergiren.

Zur Ableitung des dem früheren analogen Satzes für die Coefficienten einer Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n) = \sum_{(\mu_p)=0}^{\infty} a_{\mu_1, \mu_2, \dots \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n}$$

benöthigen wir den Hilfssatz über die rationale Function:

$$f(x_1, x_2, \dots x_n) = a_0 + a_1 x_1^{m_1^{(1)}} x_2^{m_2^{(1)}} \dots x_n^{m_n^{(1)}} + \dots + a_r x_1^{m_1^{(r)}} x_2^{m_2^{(r)}} \dots x_n^{m_n^{(r)}},$$

in der $m_1^{(p)}, m_2^{(p)}, \dots m_n^{(p)}$ ($p = 1, 2 \dots r$) positive oder negative Zahlen bezeichnen, welchem Satze gemäß die obere Grenze g der Werthe von

$$|f(x_1, x_2, \dots x_n)|$$

für alle Werthesysteme $(x_1, x_2, \dots x_n)$, bei denen

$$|x_1| = \xi_1, \quad |x_2| = \xi_2, \quad \dots |x_n| = \xi_n$$

ist, die untere Grenze $|a_0|$ besitzt.

Wählt man n Größen $\Theta_1, \Theta_2 \dots \Theta_n$ derart, daß

$$|\Theta_1| = 1, \quad |\Theta_2| = 1, \quad \dots |\Theta_n| = 1,$$

aber Θ_p keiner der Gleichungen

$$y^{m_p^{(1)}} = 1, \quad y^{m_p^{(2)}} = 1, \quad \dots y^{m_p^{(r)}} = 1$$

genügt und bildet man die Summe:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{m^n} \sum_{(\mu_p)=1}^m f(\xi_1 \Theta_1^{\mu_1-1}, \xi_2 \Theta_2^{\mu_2-1}, \dots \xi_n \Theta_n^{\mu_n-1}) = \\ & = a_0 + \frac{1}{m^n} \sum_{p=1}^r a_p \xi_1^{m_1^{(p)}} \xi_2^{m_2^{(p)}} \dots \xi_n^{m_n^{(p)}} \frac{1 - \Theta_1^{m m_1^{(p)}}}{1 - \Theta_1^{m_1^{(p)}}} \frac{1 - \Theta_2^{m m_2^{(p)}}}{1 - \Theta_2^{m_2^{(p)}}} \dots \\ & \quad \dots \frac{1 - \Theta_n^{m m_n^{(p)}}}{1 - \Theta_n^{m_n^{(p)}}}, \end{aligned}$$

so ist der absolute Betrag dieser Ausdrücke nicht größer als g . Da die rechte Seite nach passender Wahl von m beliebig wenig von a_0 verschieden sein wird, etwa um δ_m , so ist

$$|a_0 + \delta_m| < g.$$

Wäre nun $|a_0| > g$, so müßte auch ein solches δ_m existiren, daß noch

$$|a_0| - |\delta_m| > g$$

und umsomehr

$$|a_0 + \delta_m| > g$$

ausfällt. Der so hervorgebrachte Widerspruch verlangt, daß man

$$|a_0| \leq g$$

setzt.

Ist dann die obere Grenze der Werthe von $|\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n)|$

für alle Werthesysteme (x) , für welche $|x_\nu| = \xi_\nu$ ($\nu = 1, 2, \dots, n$) ist, gleich g , so wird

$$|a_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}| \leq g \xi_1^{-\mu_1} \xi_2^{-\mu_2} \dots \xi_n^{-\mu_n},$$

und für solche Stellen (x) , die innerhalb der durch die Größen ξ , fixirten Umgebung der Stelle (0) liegen, ist

$$|a_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n}| \leq g \left(\frac{|x_1|}{\xi_1}\right)^{\mu_1} \left(\frac{|x_2|}{\xi_2}\right)^{\mu_2} \dots \left(\frac{|x_n|}{\xi_n}\right)^{\mu_n}.$$

Dann wird also der absolute Betrag des einzelnen Gliedes unserer Potenzreihe nicht größer als der des gleichnamigen Gliedes der Reihe für

$$\frac{g}{\left(1 - \frac{x_1}{\xi_1}\right) \left(1 - \frac{x_2}{\xi_2}\right) \dots \left(1 - \frac{x_n}{\xi_n}\right)}.$$

Die Erweiterung dieses Theorems auf den Fall einer Potenzreihe

$$\begin{aligned} P(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \sum_{(\mu_\nu)=-\infty}^{+\infty} a_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n} = \\ &= \mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{(\mu_\nu)=0}^{-\infty} a_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n}, \end{aligned}$$

wo der Strich bei der Summe anzeigt, daß man die Combination $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n = 0$ auszuschließen habe, bildet keine Schwierigkeit. Es mag nur hervorgehoben werden, daß der durch die Bedingungen

$$R_2^{(\nu)} < |x_\nu| < R_1^{(\nu)} \quad (\nu = 1, 2, \dots, n)$$

definirte $2n$ -fach ausgedehnte zusammenhängende Convergencebereich auch dadurch ausgezeichnet sein kann, daß einige der Größen $R_2^{(\nu)}$ verschwinden.

§ 30. Summen unendlich vieler Potenzreihen.

Die Addition einer endlichen Anzahl von Potenzreihen $\mathfrak{P}_\nu(x)$ oder $P_\nu(x)$, die einen gemeinsamen Convergencebereich besitzen, bedarf keiner weiteren Erwägungen, denn es ist klar, daß die Summe der Reihen

$$\mathfrak{P}_\nu(x) = \sum_{\mu=0}^{\infty} a_\mu^{(\nu)} x^\mu \quad \text{oder} \quad P_\nu(x) = \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} a_\mu^{(\nu)} x^\mu \quad (\nu = 1, 2, \dots, n)$$

selbst wieder Potenzreihen

$$\begin{aligned} \sum_{\nu=1}^n \mathfrak{P}_\nu(x) &= \sum_{\mu=0}^{\infty} (a_\mu^{(1)} + a_\mu^{(2)} + \dots + a_\mu^{(n)}) x^\mu \\ \text{oder} \quad \sum_{\nu=-\infty}^{+\infty} P_\nu(x) &= \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} (a_\mu^{(1)} + a_\mu^{(2)} + \dots + a_\mu^{(n)}) x^\mu \end{aligned}$$

sind, die in dem den gegebenen Reihen gemeinsamen Convergenzkreise oder Ringe convergiren werden.

Sind unendlich viele Potenzreihen gegeben, so können wir die Summe nicht ohne Weiteres durch Vereinigung der gleichnamigen Glieder in eine Potenzreihe

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} A_{\mu} x^{\mu} \quad \text{oder} \quad \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} A_{\mu} x^{\mu}$$

transformiren, wo

$$A_{\mu} = \sum_{\nu=1}^{\infty} a_{\mu}^{(\nu)}$$

ist. Setzen wir aber fest, daß man einen Kreis mit dem Radius R oder einen Kreisring mit den Radien R_1 und R_2 ($0 < R_1 < R_2$) angeben kann, in welchem nicht allein jede einzelne Reihe $\mathfrak{P}_{\nu}(x)$ bzw. $P_{\nu}(x)$, sondern auch die Summen

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \mathfrak{P}_{\nu}(x) \quad \text{resp.} \quad \sum_{\nu=1}^{\infty} P_{\nu}(x)$$

der in bestimmter Aufeinanderfolge gegebenen Reihen

$$\mathfrak{P}_{\nu}(x), \quad P_{\nu}(x) \quad (\nu = 1, 2, \dots)$$

endlich sind und für alle x Werthe von gleichem absoluten Betrage gleichmäßig convergiren, so kann man zeigen, daß die Summe

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} a_{\mu}^{(\nu)} = A_{\mu}$$

für jeden bestimmten Werth von μ einen bestimmten endlichen Werth annimmt und in den genannten Bereichen die Reihen

$$\mathfrak{P}(x) = \sum_{\mu=0}^{\infty} A_{\mu} x^{\mu} \quad \text{resp.} \quad P(x) = \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} A_{\mu} x^{\mu}$$

unbedingt und gleichmäßig convergiren und

$$\mathfrak{P}(x) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \mathfrak{P}_{\nu}(x), \quad P(x) = \sum_{\nu=1}^{\infty} P_{\nu}(x)$$

wird.

Wir beschäftigen uns mit dem Falle, wo die unendlich vielen Reihen

$$P_1(x), P_2(x), \dots, P_{\nu}(x), \dots$$

gegeben sind. *)

Ist r eine in dem Intervalle von R_1 bis R_2 gelegene positive und ε eine beliebig kleine positive Größe, so kann man zufolge der Festsetzungen eine ganze Zahl m derart bestimmen, daß der absolute Betrag der Summe

*) S. Weierstraß, Zur Functionenlehre, Monatsber. der Berl. Akad. 1880.

$$\sum_{v=n}^{\infty} P_v(x)$$

für jeden Werth von x , dessen absoluter Betrag gleich r ist und für jede ganze Zahl $n \geq m$ kleiner wird als ε . Ist $n' \geq n$, so muß deshalb auch

$$\left| \sum_{v=n}^{\infty} P_v(x) \right| < \varepsilon \quad \text{und} \quad \left| \sum_{v=n}^{n'} P_v(x) \right| < 2\varepsilon$$

werden.

Ziehen wir die hier genannten $(n' - n)$ Potenzreihen zusammen, indem wir die Glieder gleicher Potenzen vereinigen, so wird der Co-

efficient von x^μ , nämlich $\sum_{v=n}^{n'} a_\mu^{(v)}$, der Bedingung genügen:

$$\left| \sum_{v=n}^{n'} a_\mu^{(v)} \right| \leq 2\varepsilon r^{-\mu}$$

und diese Ungleichung reicht zu dem Schlusse hin, daß $\sum_{v=1}^{\infty} a_\mu^{(v)} = A_\mu$ einen endlichen bestimmten Werth besitzt.

Die nun formal zu bildende Potenzreihe

$$P(x) = \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} A_\mu x^\mu$$

convergiert in dem Bereiche, wo $R_1 < |x| < R_2$ ist, unbedingt. Zum Beweise nehme man zwei positive Größen r_1 und r_2 , so daß

$$R_1 < r_1 < r < r_2 < R_2$$

wird und wähle die ganze Zahl n derart, daß

$$\left| \sum_{v=n}^{n'} a_\mu^{(v)} \right|$$

kleiner als $2\varepsilon r_2^{-\mu}$ und somit auch kleiner als $2\varepsilon r_1^{-\mu}$ ist, dann wird

$$\left| \sum_{v=n}^{\infty} a_\mu^{(v)} \right| \leq 2\varepsilon r_1^{-\mu} \quad \text{und} \quad \left| \sum_{v=n}^{\infty} a_\mu^{(v)} \right| \leq 2\varepsilon r_2^{-\mu}.$$

Bezeichnet man hierauf

$$\sum_{v=1}^{n-1} a_\mu^{(v)} = A_\mu^{(1)} \quad \sum_{v=n}^{\infty} a_\mu^{(v)} = A_\mu^{(2)},$$

wonach

$$A_\mu = A_\mu^{(1)} + A_\mu^{(2)}$$

zu setzen ist, so wird für die x Werthe von dem absoluten Betrage r

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} |A_\mu^{(2)} x^\mu| \leq 2\varepsilon \sum_{\mu=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_2}\right)^\mu, \quad \sum_{\mu=1}^{\infty} |A_\mu^{(1)} x^{-\mu}| \leq 2\varepsilon \sum_{\mu=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_1}\right)^{-\mu}$$

und

$$\sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} |A_{\mu}^{(2)} x^{\mu}| \leq 2\varepsilon \left(\frac{r_1}{r-r_1} + \frac{r_2}{r_2-r} \right)$$

d. h. die Reihe

$$\sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} A_{\mu}^{(2)} x^{\mu}$$

convergiert unbedingt und gleichmäÙig.

Die Summe der endlichen Anzahl von Reihen

$$\sum_{\nu=1}^{n-1} P_{\nu}(x) = \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} A_{\mu}^{(1)} x^{\mu}$$

besitzt selbstverständlich dieselben Eigenschaften und daher ist auch

$$\sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} A_{\mu} x^{\mu} = P(x)$$

eine für jeden x -Werth, dessen absoluter Betrag in dem Intervall von R_1 bis R_2 liegt, *absolut, unbedingt und gleichmäÙig convergente Reihe*.

Schließlich ist die gewonnene Reihe $P(x)$ daselbst gleich $\sum_{\nu=1}^{\infty} P_{\nu}(x)$, denn man kann in der Ungleichung

$$\left| \sum_{\nu=1}^{\infty} P_{\nu}(x) - \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} A_{\mu} x^{\mu} \right| = \left| \sum_{\nu=n}^{\infty} P_{\nu}(x) - \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} A_{\mu}^{(2)} x^{\mu} \right| \leq 2\varepsilon + 2\varepsilon \left(\frac{r_1}{r} - \frac{1}{1-\frac{r_1}{r}} + \frac{1}{1-\frac{r}{r_2}} \right)$$

ε stets so klein wählen, daß die von n unabhängige rechte Seite für jeden Werth $r = |x|$ unseres Intervalles kleiner wird als eine noch so kleine GröÙe δ , was für unsere Behauptung genügt. —

Es sei andererseits eine unendliche Anzahl von Potenzreihen mehrerer Variabeln in bestimmter Aufeinanderfolge gegeben:

$$\mathfrak{P}_{\nu}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{(\mu_{\nu})=0}^{\infty} a_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}^{(\nu)} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n} \quad (\nu = 1, 2, \dots)$$

und es gebe eine Umgebung (R) der Stelle (0) , für deren Punkte (x) jede einzelne Reihe \mathfrak{P}_{ν} und auch die Summe

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \mathfrak{P}_{\nu}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

convergiert und zwar gleichmäÙig convergiert für alle Stellen (x) , bei denen

$$x_1, x_2, \dots, x_n$$

der Reihe nach denselben absoluten Betrag $r_1 < R_1$, $r_2 < R_2, \dots$ $r_n < R_n$ besitzen.

Jetzt kann man nach Angabe von n Größen r_1, r_2, \dots, r_n und einer beliebig kleinen Größe ε eine ganze Zahl m so bestimmen, daß für jedes Werthesystem (x_1, x_2, \dots, x_n) der Beschaffenheit:

$$|x_1| = r_1, \quad |x_2| = r_2, \quad \dots \quad |x_n| = r_n$$

und jede ganze Zahl $n \geq m$

$$\left| \sum_{\nu=n}^{\infty} \mathfrak{P}_{\nu}(x_1, x_2, \dots, x_n) \right| < \varepsilon,$$

und für jede ganze Zahl $n' \geq n$

$$\left| \sum_{\nu=n}^{n'} \mathfrak{P}_{\nu}(x_1, x_2, \dots, x_n) \right| < 2\varepsilon.$$

Dann aber muß

$$\left| \sum_{\nu=n}^{n'} a_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}^{(\nu)} \right| \leq 2\varepsilon r_1^{-\mu_1} r_2^{-\mu_2} \dots r_n^{-\mu_n}$$

sein und

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} a_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}^{(\nu)} = A_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}$$

wird endlich.

Die Potenzreihe

$$\sum_{(\mu_{\nu})=0}^{\infty} A_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n} = \mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

ist in der Umgebung (R) von (0) auch unbedingt convergent, denn nach der Zerlegung

$$\begin{aligned} A_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} &= \sum_{\nu=1}^{n-1} a_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}^{(\nu)} + \sum_{\nu=n}^{\infty} a_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}^{(\nu)} \\ &= A_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}^{(1)} + A_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}^{(2)} \end{aligned}$$

ist

$$|A_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}^{(2)}| \leq 2\varepsilon r_1^{-\mu_1} r_2^{-\mu_2} \dots r_n^{-\mu_n}$$

und für alle Stellen (x) , für welche

$$|x_1| = \varrho_1 < r_1, \quad |x_2| = \varrho_2 < r_2, \quad \dots \quad |x_n| = \varrho_n < r_n$$

ist, gilt die Beziehung:

$$\begin{aligned} \sum_{(\mu_{\nu})=0}^{\infty} |A_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}^{(2)} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n}| &\leq 2\varepsilon \sum_{(\mu_{\nu})=0}^{\infty} \left(\frac{\varrho_1}{r_1}\right)^{\mu_1} \left(\frac{\varrho_2}{r_2}\right)^{\mu_2} \dots \left(\frac{\varrho_n}{r_n}\right)^{\mu_n} \\ &= 2\varepsilon \left[\left(1 - \frac{\varrho_1}{r_1}\right) \left(1 - \frac{\varrho_2}{r_2}\right) \dots \left(1 - \frac{\varrho_n}{r_n}\right) \right]^{-1}, \end{aligned}$$

also die Summe links ist endlich. Dasselbe gilt für die Summe

$$\sum_{(\mu_r)=0}^{\infty} |A_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}^{(1)} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n}|$$

und deshalb ist auch $\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ für die genannten Stellen und in der ganzen Umgebung (R) von (0) endlich.

Schließlich gibt die durch Vereinigung der gleichnamigen Glieder unserer Reihen \mathfrak{P}_r gewonnenen Reihe \mathfrak{P} in der Umgebung (R) der Stelle (0) dieselben Werthe wie $\sum_{r=1}^{\infty} \mathfrak{P}_r$, denn es ist der absolute Betrag

$$\left| \sum_{r=1}^{\infty} \mathfrak{P}_r - \mathfrak{P} \right| < 2\varepsilon + 2\varepsilon \left[\left(1 - \frac{\varrho_1}{r_1}\right) \left(1 - \frac{\varrho_2}{r_2}\right) \dots \left(1 - \frac{\varrho_n}{r_n}\right) \right]^{-1}$$

und kleiner als jede noch so kleine Gröfse δ .

Die Tragweite der vorstehenden Theoreme geht aus den folgenden Sätzen hervor:

- 1) Das Product zweier in der Umgebung R der Stellen $x = 0$ convergenten Potenzreihen

$$\mathfrak{P}_1(x) = \sum_{\mu=0}^{\infty} a_{\mu} x^{\mu}, \quad \mathfrak{P}_2(x) = \sum_{\mu=0}^{\infty} b_{\mu} x^{\mu}$$

läßt sich in eine Potenzreihe entwickeln, die in demselben Bereiche convergirt.

In der That ist die Summe der unendlich vielen Potenzreihen

$$b_{\mu} x^{\mu} \sum_{r=0}^{\infty} a_r x^r \quad (\mu = 0, 1, 2, \dots)$$

in der Umgebung R der Stelle 0 gleichmäfsig convergent, denn es gibt eine solche ganze Zahl m , daß für jedes x mit einem absoluten Betrage $r < R$

$$\left| \sum_{\mu=m'}^{\infty} b_{\mu} x^{\mu} \right| < \varepsilon \quad (m' > m) \quad \text{und} \quad \left| \mathfrak{P}_1(x) \sum_{\mu=m'}^{\infty} b_{\mu} x^{\mu} \right| < \varepsilon |\mathfrak{P}_1(x)|$$

wird, und weil die Reihe $\mathfrak{P}_1(x)$ daselbst convergirt, kann man m auch so wählen, daß $\varepsilon |\mathfrak{P}_1(x)|$ kleiner wird als eine beliebig kleine positive Gröfse δ .

Jetzt darf man die unendlich vielen Potenzreihen in der früheren Weise vereinigen und es wird:

$$\begin{aligned} \sum_{\mu=0}^{\infty} (b_{\mu} x^{\mu} \mathfrak{P}_1(x)) &= \sum_{\lambda=0}^{\infty} (a_0 b_{\lambda} + a_1 b_{\lambda-1} + \dots + a_{\lambda-1} b_1 + a_{\lambda} b_0) x^{\lambda} \\ &= \sum_{\lambda=1}^{\infty} c_{\lambda} x^{\lambda} = \mathfrak{P}(x) = \mathfrak{P}_1(x) \cdot \mathfrak{P}_2(x). \end{aligned}$$

- 2) Eine ganze rationale Function

$$f(y_1, y_2, \dots, y_n)$$

der n Potenzreihen

$$y_\nu = \mathfrak{P}_\nu(x) \quad (\nu = 1, 2, \dots, n)$$

mit einem gemeinsamen Convergencebereiche $|x| < R$ läßt sich in eine ebendasselbst convergente Potenzreihe $\mathfrak{P}(x)$ transformiren.

- 3) Setzt man für y_ν Potenzreihen mehrerer Variabeln

$$y_\nu = \mathfrak{P}_\nu(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

so geht $f(y_1, y_2, \dots, y_n)$ in eine in dem gemeinsamen Convergencebereich der Reihen \mathfrak{P}_ν convergente Potenzreihe über.

- 4) Tritt an Stelle der ganzen rationalen Function f eine convergente Potenzreihe

$$f(y) = \sum_{\nu=0}^{\infty} a_\nu y^\nu$$

und setzt man hierin für y eine Potenzreihe mit dem Convergence radius R

$$y = \sum_{\mu=0}^{\infty} b_\mu x^\mu = \mathfrak{P}(x),$$

so wird $f(y)$ in eine nach Potenzen von x fortschreitende convergente Potenzreihe zu entwickeln sein, wenn die Summe der unendlich vielen Reihen

$$\sum_{\nu=0}^{\infty} a_\nu \mathfrak{P}^\nu(x)$$

in einer Umgebung der Stelle $x = 0$ gleichmäßig convergirt. Bezeichnet x' eine Stelle in dem Convergencebereiche der Reihe $\mathfrak{P}(x)$,

an welcher nicht allein $|\mathfrak{P}(x)|$, sondern auch $\sum_{\mu=0}^{\infty} |b_\mu x^\mu|$ einen in dem

Convergenzkreise der Reihe $f(y)$ liegenden Werth erhält, so wird die angegebene Summe gewiß gleichmäßig convergiren, so lange

$$|x| < |x'|,$$

und in diesem Bereiche ist

$$\sum_{\nu=0}^{\infty} a_\nu y^\nu = \sum_{\lambda} c_\lambda x^\lambda.$$

Falls die Potenzreihe $f(y)$ beständig convergirt, wird die neue Reihe so lange convergiren, als x in dem Convergenzkreise der Potenzreihe $\mathfrak{P}(x)$ bleibt. Wenn $\mathfrak{P}(x)$ eine beständig convergente Reihe ist, muß der Convergenzkreis der neuen Reihe so groß sein als der der Reihe $f(y)$, und wenn endlich $\mathfrak{P}(x)$ und $f(y)$ beständig convergiren, wird auch die Reihe $\sum_{\lambda} c_\lambda x^\lambda$ einen unendlich großen Convergence radius besitzen.

5) Ist $f(y_1, y_2, \dots, y_n)$ eine Potenzreihe

$$\sum_{(\mu_\nu)=0}^{\infty} a_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} y_1^{\mu_1} y_2^{\mu_2} \dots y_n^{\mu_n}$$

und sind y_ν Potenzreihen mit einem gemeinsamen Convergencebereich:

$$y_\nu = \mathfrak{P}_\nu(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{(\mu_\nu)=0}^{\infty} b_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}^{(\nu)} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n}$$

und gibt es ein Werthesystem

$$|x_1| = \xi_1, \quad |x_2| = \xi_2 \dots |x_n| = \xi_n,$$

für welches die n Summen

$$\sum_{(\mu_\nu)=0}^{\infty} |b_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}^{(\nu)}| \xi_1^{\mu_1} \xi_2^{\mu_2} \dots \xi_n^{\mu_n}$$

die Werthe η_ν ($\nu = 1, 2, \dots, n$) erhalten, die eine Stelle in dem Convergencebereiche der Reihe $f(y_1, y_2, \dots, y_n)$ constituiren, so kann man offenbar $f(y_1, y_2, \dots, y_n)$ in eine Potenzreihe

$$\sum_{(\lambda_\nu)=0}^{\infty} c_{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n} x_1^{\lambda_1} x_2^{\lambda_2} \dots x_n^{\lambda_n} = \mathfrak{P}'(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

entwickeln, die für alle Stellen der Umgebung (ξ) von (0) convergirt, und dort gibt sie dieselben Werthe, die $f(y_1, y_2, \dots, y_n)$ in der Umgebung (η) annimmt.

Ist wiederum $f(y_1, y_2, \dots, y_n)$ beständig oder für jede endliche Stelle (y) convergent, so ist $\mathfrak{P}'(x_1, x_2, \dots, x_n)$ an allen Stellen des gemeinsamen Convergencebereiches von $\mathfrak{P}_\nu(x_1, x_2, \dots, x_n)$ convergent, und $\mathfrak{P}'(x_1, x_2, \dots, x_n)$ convergirt beständig, wenn der gemeinsame Convergencebereich der Reihen \mathfrak{P}_ν alle endlichen Stellen (x) enthält.

6) Die Sätze unter Nummer 4) und 5) lassen sich insofern erweitern, als man in die gegebene Reihe f Potenzreihen einsetzen darf, die mehr Variable enthalten als f .

Substituirt man z. B. an Stelle von y_ν eine Summe $u_\nu + v_\nu$, und sind $u_\nu^{(1)}, v_\nu^{(1)}$ Werthe, für welche

$$f(u_1^{(1)} + v_1^{(1)}, u_2^{(1)} + v_2^{(1)}, \dots, u_n^{(1)} + v_n^{(1)})$$

endlich ist, so kann man die Reihe $f(y_1, y_2, \dots, y_n)$ in eine Reihe nach Potenzen der neuen Variablen transformiren, die gewifs so lange convergirt, als

$$|u_\nu| < |u_\nu^{(1)}|, \quad |v_\nu| < |v_\nu^{(1)}| \quad (\nu = 1, 2, \dots, n).$$

Dabei ist es aber erlaubt, die Reihe nach Potenzen der Gröfsen u oder der Gröfsen v zu ordnen und als Coefficienten Potenzreihen nach v oder u anzuschreiben. Jede der Reihen convergirt in dem durch die Bedingungen

$$|u_v| + |v_v| < R_v \quad (v = 1, 2, \dots, n)$$

definierten Bereiche, wenn $f(y_1, y_2, \dots, y_n)$ in der Umgebung (R) von (0) convergirt.

Bevor wir noch den Quotienten zweier in einer Umgebung der Stelle Null convergenten Potenzreihen in eine neue Potenzreihe entwickeln, schicken wir den Hilfssatz voraus:

Ist der Convergenzradius R einer an der Stelle Null nicht verschwindenden Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x) = \sum_{\mu=0}^{\infty} b_{\mu} x^{\mu}$$

von Null verschieden, so gibt es auch eine Umgebung $R_1 \leq R$ der Stelle Null, wo die Potenzreihe nicht verschwindet.

Ist r eine positive GröÙe kleiner als R und g die obere Grenze der Werthe $|\mathfrak{P}(x)|$ für alle Stellen x in der Entfernung r von Null, so gilt die Beziehung

$$|b_{\mu}| \leq g r^{-\mu} \quad (\mu = 0, 1, 2, \dots)$$

und für ein $|x| = \varrho < r$ ist

$$|b_{\mu}| \varrho^{\mu} \leq g \left(\frac{\varrho}{r}\right)^{\mu}$$

und

$$|b_1 x + b_2 x^2 + \dots| \leq \sum_{\mu=1}^{\infty} |b_{\mu}| \varrho^{\mu} \leq g \sum_{\mu=1}^{\infty} \left(\frac{\varrho}{r}\right)^{\mu} = g \frac{\varrho}{r} \frac{1}{1 - \frac{\varrho}{r}}.$$

Der Voraussetzung zufolge ist $|b_0|$ nicht Null, und darum kann man die GröÙe ϱ so bestimmen, daß

$$g \frac{\varrho}{r - \varrho} < |b_0|.$$

Bezeichnet R_1 einen dieser Bedingung genügenden Werth, so wird für alle Stellen der Umgebung R_1 von $x=0$ umsomehr

$$|b_1 x + b_2 x^2 + \dots| < |b_0|$$

und darum kann

$$|\mathfrak{P}(x)|$$

dasselbst nicht verschwinden. Es ist also ein Bereich der verlangten Art gefunden. —

Ist die vorgegebene Potenzreihe eine mit mehreren Variablen:

$$\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{(\mu_n)=0}^{\infty} b_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n},$$

und hierin $b_{0,0,\dots,0}$ von Null verschieden, ist ferner R eine positive GröÙe, die kleiner ist als jede der den Convergenzbereich der Reihe fixirenden GröÙen (R_1, R_2, \dots, R_n) und g die obere Grenze der Werthe $|\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n)|$ für alle durch die Bedingungen

$$|x_1| = |x_2| = \dots = |x_n| = r < R$$

charakterisirten Stellen (x) , so wird

$$|b_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}| \leq g r^{-(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n)}$$

und an den Stellen (x) , für welche $|x_v| = \varrho_v < r$ ($v = 1, 2, \dots, n$) ist, muß

$$\left| \sum_{(\mu_v)=0}^{\infty} b_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n} \right| \leq g \sum_{(\mu_v)=0}^{\infty} \left(\frac{\varrho_1}{r}\right)^{\mu_1} \left(\frac{\varrho_2}{r}\right)^{\mu_2} \dots \left(\frac{\varrho_n}{r}\right)^{\mu_n} \\ = g \left\{ \left[\left(1 - \frac{\varrho_1}{r}\right) \left(1 - \frac{\varrho_2}{r}\right) \dots \left(1 - \frac{\varrho_n}{r}\right) \right]^{-1} - 1 \right\}$$

sein. Doch weil man die Größen $\varrho_1, \varrho_2, \dots, \varrho_n$ so wählen kann, daß die rechte Seite kleiner wird als die endliche von Null verschiedene GröÙe $|b_{0,0,\dots,0}|$, so kann man auch für die Potenzreihe mehrerer Variablen eine Umgebung der Stelle (0) angeben, wo sie den Werth Null nicht annimmt.

In einem solchen Bereiche läßt sich

$$\frac{1}{\mathfrak{P}} = \frac{1}{b_{0,0,\dots,0} + \sum_{(\mu_v)=0}^{\infty} b_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n}} = \frac{1}{b_{0,0,\dots,0} + y}$$

in eine Potenzreihe

$$\bar{\mathfrak{P}}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

entwickeln, denn solange $|q| < |p|$ gilt die Formel

$$\frac{1}{p+q} = \frac{1}{p} \sum_{v=0}^{\infty} (-1)^v \left(\frac{q}{p}\right)^{v-1}$$

und die mit y bezeichnete Potenzreihe hat gerade die Beschaffenheit, welche nach einem der früheren Sätze nothwendig ist, damit die Substitution dieser Reihe in

$$\frac{1}{b_{0,0,\dots,0} + y} = \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(-1)^v}{b_{0,0,\dots,0}} \left(\frac{y}{b_{0,0,\dots,0}}\right)^v$$

eine in dem besagten Bereiche convergente Potenzreihe gibt.

7) Jetzt ist aber auch der Quotient zweier convergenter Potenzreihen

$$\mathfrak{P}_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{und} \quad \mathfrak{P}_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

in eine Potenzreihe $\mathfrak{P}_3(x_1, x_2, \dots, x_n)$ zu entwickeln, wenn nur $\mathfrak{P}_2(0, 0, \dots, 0)$ von Null verschieden ist.

In dem Convergenzbereiche von \mathfrak{P}_3 , der jedenfalls in dem gemeinsamen Convergenzbereiche der Reihen \mathfrak{P}_1 und \mathfrak{P}_2 die Umgebung der Stelle (0) bildet, wo der Nenner nicht verschwindet, ist

$$\frac{\mathfrak{P}_1}{\mathfrak{P}_2} = \mathfrak{P}_3 \quad \text{und} \quad \mathfrak{P}_1 = \mathfrak{P}_3 \cdot \mathfrak{P}_2.$$

Ist $\mathfrak{P}_1(x) = \sum_{\nu=0}^{\infty} a_{\nu} x^{\nu}$ und $\mathfrak{P}_2(x) = \sum_{\mu=m}^{\infty} b_{\mu} x^{\mu}$, so kann man immer noch einen Bereich angeben, wo

$$|b_{m+1}x + b_{m+2}x^2 + \dots| < |b_m|,$$

und man darf

$$\frac{\mathfrak{P}_1(x)}{\mathfrak{P}_2(x)} = \frac{1}{x^m} \frac{\sum_{\nu=0}^{\infty} a_{\nu} x^{\nu}}{\sum_{\mu=0}^{\infty} b_{m+\mu} x^{\mu}} = \frac{1}{x^m} \mathfrak{P}_3(x) = \sum_{\lambda=-m}^{\infty} c_{\lambda} x^{\lambda}$$

setzen.

Den entsprechenden Fall für den Quotienten von Potenzreihen mehrerer Variabeln wollen wir bei späterer Gelegenheit untersuchen, da die unendlich vielen hier auftretenden Nullstellen des Nenners in einer beliebig kleinen Umgebung der Stelle (0) Schwierigkeiten machen. Sehr wohl kann aber der Satz bewiesen werden:

8) Der Quotient ganzer Functionen ohne gemeinsamen Theiler:

$$\frac{f(y_1, y_2, \dots, y_n)}{g(y_1, y_2, \dots, y_n)}$$

geht durch die Substitutionen

$$y_{\nu} = \mathfrak{P}_{\nu}(x) \quad (\nu = 1, 2 \dots n)$$

in eine Potenzreihe $\mathfrak{P}(x)$ über, die in dem gemeinsamen Convergenzbereich der Reihen $\mathfrak{P}_{\nu}(x)$ so lange convergirt, als x nicht einen Werth annimmt, dem eine Nullstelle (y) von g entspricht.

9) Der Quotient zweier Potenzreihen

$$\frac{\mathfrak{P}_1(y_1, y_2, \dots, y_n)}{\mathfrak{P}_2(y_1, y_2, \dots, y_n)},$$

dessen Nenner an der Stelle (0) nicht verschwindet, kann auch wieder durch die obigen Substitutionen in eine Potenzreihe $\mathfrak{P}(x)$ verwandelt werden, nur muß die Stelle

$$y_{\nu}^{(0)} = \mathfrak{P}_{\nu}(0) \quad (\nu = 1, 2 \dots n)$$

in dem Convergenzbereich der gegebenen Reihen liegen; dann gibt es einen Bereich $|x| < r$, dem nur Stellen (y) des Convergenzbereiches von \mathfrak{P}_1 und \mathfrak{P}_2 angehören, und die Transformation in $\mathfrak{P}(x)$ ist möglich.

Wir unterbrechen diese Erwägungen, die die Bildung einer unübersehbaren Menge convergenter Potenzreihen gestatten, und ziehen aus den Sätzen über die an der Stelle Null nicht verschwindenden Potenzreihen einen Schluss, der die formale Bildung neuer Potenzreihen wesentlich erleichtert.

Da eine Potenzreihe $\mathfrak{P}(x)$, die für $x = 0$ nicht verschwindet, in einem endlichen Bereiche um die Stelle Null keine Nullstelle besitzt, so folgt, daß eine Potenzreihe, die für unendlich viele unendlich kleine Werthe von x oder an unendlich vielen Stellen jeder beliebig kleinen Umgebung von $x = 0$ verschwindet, identisch Null sein muß.

Wenn daher zwei Potenzreihen an unendlich vielen Stellen einer Punktmenge, deren abgeleitete Punktmenge die Stelle Null enthält, dieselben Werthe annehmen, so ist die Differenz eine identisch verschwindende Potenzreihe, d. h. die Coefficienten derselben sind alle Null, und die Coefficienten gleichnamiger Glieder der gegebenen Reihen sind einander gleich.

Aus diesem Satze geht hervor, daß man zur Berechnung der Potenzreihe $\sum_{\lambda=0}^{\infty} c_{\lambda} x^{\lambda}$, in welche sich der Quotient

$$\frac{\mathfrak{P}_1(x)}{\mathfrak{P}_2(x)} = \frac{\mathfrak{P}_1(x)}{b_0 + \sum_{\mu=1}^{\infty} b_{\mu} x^{\mu}}$$

entwickeln läßt, nicht erst die Entwicklung von $\mathfrak{P}_2^{-1}(x)$ und dann die Multiplication mit $\mathfrak{P}_1(x)$ nothwendig hat, sondern man setze

$$\mathfrak{P}_1(x) = \mathfrak{P}_2(x) \sum_{\lambda=0}^{\infty} c_{\lambda} x^{\lambda}$$

und bestimme die unbestimmt gelassenen Coefficienten c_{λ} so, daß in dem Producte der Coefficient von x^{ν} gleich a_{ν} ist. Man erhält die Folge von Gleichungen

$$\begin{aligned} a_0 &= b_0 c_0 \\ a_1 &= b_0 c_1 + b_1 c_0 \\ a_2 &= b_0 c_2 + b_1 c_1 + b_2 c_0 \\ &\dots \dots \dots \\ a_{\nu} &= b_0 c_{\nu} + b_1 c_{\nu-1} + b_2 c_{\nu-2} + \dots + b_{\nu-1} c_1 + b_{\nu} c_0 \\ &\dots \dots \dots \end{aligned}$$

aus denen sich die Gröößen c_{λ} successive berechnen lassen. Das Gesetz der Composition aus den Gröößen a_{ν} und b_{μ} ist ein ziemlich complicirtes.

Bei dieser „Methode der unbestimmten Coefficienten“ darf man nicht am Ende folgendermaßen verfahren:

Die Gleichung

$$\sum_{\nu} a_{\nu} x^{\nu} - \sum_{\mu} b_{\mu} x^{\mu} \sum_{\lambda} c_{\lambda} x^{\lambda} = 0$$

oder

$$\sum_{\nu=0}^{\infty} a_{\nu} x^{\nu} - \sum_{\mu=0}^{\infty} (b_0 c_{\mu} + b_1 c_{\mu-1} + \dots + b_{\mu} c_0) x^{\mu} = 0$$

besteht für $x = 0$ und darum ist $a_0 = b_0 c_0$. Weil dann

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} a_{\nu} x^{\nu} - \sum_{\mu=1}^{\infty} (b_0 c_{\mu} + b_1 c_{\mu-1} + \dots + b_{\mu} c_0) x^{\mu} = 0 \quad (\alpha)$$

wird, kann man durch x dividiren und die nach der Division zu vollziehende Substitution des Werthes Null für x gibt $a_1 = b_0 c_1 + b_1 c_0$ usw.

Diese Schlufsfolge ist unrichtig, denn man darf durch x nicht dividiren, wenn man gefunden hat, daß die Gleichung (α) gerade für $x = 0$ besteht, und man kann von vornherein nicht wissen, daß die Reihen

$$\sum_{\nu=0}^{\infty} a_{\nu+1} x^{\nu} \quad \text{und} \quad \sum_{\mu=0}^{\infty} (b_0 c_{\mu+1} + b_1 c_{\mu} + \dots + b_{\mu+1} c_0) x^{\mu}$$

auch für den Werth $x = 0$ übereinstimmen. Mit anderen Worten, man darf auf die Identität zweier Reihen erst dann schliessen, wenn sie für unendlich viele unendlich kleine Werthe der Variablen gleiche Werthe besitzen.

Zwei Potenzreihen mehrerer Variablen x_1, x_2, \dots, x_n , die für alle Combinationen (x) von n nach Null convergirenden Werthereihen für x_{ν} :

$$x_{\nu}^{(1)}, x_{\nu}^{(2)}, \dots, x_{\nu}^{(\mu)} \dots \quad (\nu = 1, 2, \dots, n)$$

übereinstimmen, sind identisch gleich, denn die Differenz ist eine Potenzreihe, die für unendlich viele Stellen (x) jeder (noch so kleinen) Umgebung der Stelle (0) verschwindet.

Wir können wieder sagen, eine Potenzreihe ist identisch Null, wenn sie für eine Punktmenge, die die Stelle (0) zur Häufungs- oder Grenzstelle hat, verschwindet.

§ 31. Die abgeleitete Potenzreihe.

Aus jeder einzelnen convergenten Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x) = \sum_{\nu=0}^{\infty} a_{\nu} x^{\nu}$$

kann man unendlich viele andere ableiten. Bezeichnet x_0 einen bestimmten Werth, dessen absoluter Betrag kleiner ist als der wahre Convergenzradius R und setzen wir

$$x = x_0 + h,$$

wo

$$|x| = |x_0 + h| \leq |x_0| + |h| < R$$

sein soll, so kann man die Summe der unendlich vielen ganzen Functionen von h

$$f_{\nu}(h) = a_{\nu}(x_0 + h)^{\nu} \quad (\nu = 1, 2, \dots)$$

durch Vereinigung der gleichnamigen Glieder in h bilden, denn die Summe

$$\sum_{v=0}^{\infty} f_v(h)$$

ist so lange gleichmäßig convergent, als $|h| < R - |x_0|$ ist. Es entsteht die Reihe

$$\mathfrak{P}(x_0 + h) = \sum_{v=0}^{\infty} a_v(x_0 + h)^v = \mathfrak{P}_0(x_0) + \mathfrak{P}_1(x_0)h + \mathfrak{P}_2(x_0)h^2 + \dots,$$

wo die Coefficienten $\mathfrak{P}_v(x_0)$ Potenzreihen in x_0 sind, die endlich bleiben, wenn x_0 in dem Convergencebereiche der Reihe $\mathfrak{P}(x)$ liegt.

Für den Werth $h = 0$ wird

$$\mathfrak{P}(x_0) = \mathfrak{P}_0(x_0),$$

was x_0 auch für einen Werth in dem Convergencekreise von $\mathfrak{P}(x)$ haben mag, daher ist

$$\mathfrak{P}(x) = \mathfrak{P}_0(x)$$

und

$$\mathfrak{P}(x_0 + h) - \mathfrak{P}(x_0) = \mathfrak{P}_1(x_0)h + h[\mathfrak{P}_2(x_0)h + \mathfrak{P}_3(x_0)h^2 + \dots].$$

Der Klammerausdruck wird für unendlich kleine Größen h selbst unendlich klein, und man schließt neuerdings, daß die Potenzreihe $\mathfrak{P}(x)$ an jeder Stelle ihres Convergencebereiches stetig veränderlich ist.

Die Potenzreihe $\mathfrak{P}_1(x)$ heißt die *Derivirte* oder *Ableitung* von $\mathfrak{P}(x)$ und $\mathfrak{P}_1(x_0)$ ist die Derivirte von $\mathfrak{P}(x)$ an der Stelle x_0 ; sie ist unabhängig von dem Werthe des Incrementes h , welches wir mit dx_0 bezeichnen und das *Differential* von x an der Stelle x_0 nennen. Das Product

$$\mathfrak{P}_1(x_0) dx_0$$

wird als *Differentialänderung* von $\mathfrak{P}(x)$ an der Stelle x_0 bezeichnet und indem man

$$\mathfrak{P}_1(x_0) dx_0 = d\mathfrak{P}(x_0)$$

schreibt, heißt

$$\mathfrak{P}_1(x_0) = \frac{d\mathfrak{P}(x_0)}{dx_0}$$

auch der *Differentialquotient* an der Stelle x_0 .

Die Ableitung $\mathfrak{P}_1(x)$ ist, wie wir aus der nach h -Potenzen geordneten Reihe $\sum_v a_v(x+h)^v$ ansehen, durch die Reihe

$$\sum_{v=1}^{\infty} v a_v x^{v-1}$$

definirt. Bildet man aus derselben

$$\mathfrak{P}_1(x_0 + h) = \sum_{v=1}^{\infty} v a_v(x_0 + h)^{v-1} = \mathfrak{P}_{1,0}(x_0) + \mathfrak{P}_{1,1}(x_0)h + \mathfrak{P}_{1,2}(x_0)h^2 + \dots,$$

so ergibt sich leicht, daß

$$\mathfrak{P}_1(x_0) = \mathfrak{P}_{1,0}(x_0) \quad \text{und} \quad \mathfrak{P}_1(x) = \mathfrak{P}_{1,0}(x).$$

$$\mathfrak{P}_{1,1}(x_0) = \sum_{\nu=2}^{\infty} \nu(\nu-1) a_{\nu} x_0^{\nu-2} = \frac{1}{1.2} \mathfrak{P}_2(x_0) = \mathfrak{P}^{(2)}(x_0)$$

ist und daß allgemein die Derivirte von $\mathfrak{P}_1(x)$ oder $\frac{d\mathfrak{P}_1(x)}{dx} = \mathfrak{P}^{(2)}(x)$ zu setzen ist. Man nennt die Reihe

$$\sum_{\nu=2}^{\infty} \nu(\nu-1) a_{\nu} x^{\nu-2},$$

welche durch denselben Proceß aus $\mathfrak{P}_1(x)$ zu bilden ist, wie $\mathfrak{P}_1(x)$ aus $\mathfrak{P}(x)$, d. h. dadurch daß man an Stelle von x^{μ} $\mu x^{\mu-1}$ setzt, die zweite Derivirte von $\mathfrak{P}(x)$ und bezeichnet dieselbe anstatt durch

$$\frac{d\left(\frac{d\mathfrak{P}(x)}{dx}\right)}{dx} \quad \text{mit} \quad \frac{d^2\mathfrak{P}(x)}{dx^2}$$

und die zweite Differentialänderung mit

$$\mathfrak{P}^{(2)}(x) dx = d\mathfrak{P}_1(x) = d^2\mathfrak{P}(x).$$

So fortschreitend gelangt man zu der n^{ten} Derivirten von $\mathfrak{P}(x)$ oder dem n^{ten} Differentialquotienten

$$\mathfrak{P}^{(n)}(x) = \frac{1}{n!} \mathfrak{P}_n(x) = \frac{d^n \mathfrak{P}(x)}{dx^n} = \sum_{\nu=n}^{\infty} \nu(\nu-1) \dots (\nu-n+1) a_{\nu} x^{\nu-n}.$$

Diese Potenzreihe ist von der Gestalt

$$n! a_{\nu} + x \mathfrak{P}^{(n)}(x),$$

und man sieht, daß der Coefficient von x^n in der Reihe $\mathfrak{P}(x)$ gleich

$$\frac{1}{n!} \left(\frac{d^n \mathfrak{P}(x)}{dx^n} \right)_{x=0} = \frac{1}{n!} \mathfrak{P}^{(n)}(0),$$

und der Coefficient $\mathfrak{P}_n(x_0)$ gleich

$$\frac{1}{n!} \left(\frac{d^n \mathfrak{P}(x)}{dx^n} \right)_{x=x_0} = \frac{1}{n!} \mathfrak{P}^{(n)}(x_0)$$

ist. Schreibt man noch für \mathfrak{P} , $\mathfrak{P}^{(1)}$ oder \mathfrak{P}' , so wird

$$\mathfrak{P}(x) = \mathfrak{P}(0) + \mathfrak{P}^{(1)}(0) \frac{x}{1} + \mathfrak{P}^{(2)}(0) \frac{x^2}{2!} + \dots$$

$$\mathfrak{P}(x_0 + h) = \mathfrak{P}(x_0) + \mathfrak{P}^{(1)}(x_0) \frac{h}{1} + \mathfrak{P}^{(2)}(x_0) \frac{h^2}{2!} + \dots$$

und wenn man hier an Stelle von $x_0 + h$ x setzt, entsteht die Reihe:

$$\mathfrak{P}[x_0 + (x - x_0)] = \mathfrak{P}(x_0) + \mathfrak{P}^{(1)}(x_0) \frac{x - x_0}{1} + \mathfrak{P}^{(2)}(x_0) \frac{(x - x_0)^2}{2!} + \dots$$

Diese auch direct durch die Substitution

$$x_0 + (x - x_0) \quad \text{für} \quad x_0$$

aus $\mathfrak{P}(x)$ ableitbare Potenzreihe, die wir mit

$$\mathfrak{P}(x|x_0) \quad \text{oder} \quad \mathfrak{P}(x - x_0)$$

bezeichnen, convergirt zum mindesten so lange als

$$|x - x_0| < R - |x_0|,$$

d. h. für alle Stellen in dem um x_0 mit dem Radius $R - |x_0|$ beschriebenen Kreise. Dieser Convergencebereich braucht nicht der wahre zu sein, aber an den ihm angehörigen Stellen x hat $\mathfrak{P}(x - x_0)$ denselben Werth wie $\mathfrak{P}(x)$, dort ist

$$\sum_{\nu=0}^{\infty} a_{\nu} [x_0 + (x - x_0)]^{\nu} \equiv \sum_{\nu=0}^{\infty} \mathfrak{P}^{(\nu)}(x_0) \frac{(x - x_0)^{\nu}}{\nu!}.$$

Ist nun auch eine Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)=0}^{\infty} a_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} x_1^{\mu_1} x_2^{\mu_2} \dots x_n^{\mu_n}$$

vorgelegt und sind

$$(x^{(0)}) \quad \text{und} \quad (x^{(0)} + h)$$

Stellen in dem Convergencebereiche, so kann man

$$\mathfrak{P}(x_1^{(0)} + h_1, x_2^{(0)} + h_2, \dots, x_n^{(0)} + h_n)$$

in eine nach Potenzen von h_1, h_2, \dots, h_n fortschreitende Reihe

$$\sum_{(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)=0}^{\infty} \mathfrak{P}_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) h_1^{\mu_1} h_2^{\mu_2} \dots h_n^{\mu_n}$$

entwickeln. Die Coefficienten sind wieder Potenzreihen in den Größen $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$, und wieder gilt

$$\mathfrak{P}_{0,0,\dots,0}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Die Coefficienten von h_1, h_2, \dots, h_n , nämlich

$\mathfrak{P}_{1,0,\dots,0}(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$, $\mathfrak{P}_{0,1,0,\dots,0}(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$, \dots , $\mathfrak{P}_{0,0,\dots,1}(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ heißen die *partiellen Ableitungen* der Reihe \mathfrak{P} nach den Variablen x_1, x_2, \dots, x_n an der Stelle $(x^{(0)})$. Man bezeichnet sie mit

$$\left(\frac{\partial \mathfrak{P}}{\partial x_1} \right)_{(x^{(0)})}, \quad \left(\frac{\partial \mathfrak{P}}{\partial x_2} \right)_{(x^{(0)})} \quad \dots \quad \left(\frac{\partial \mathfrak{P}}{\partial x_n} \right)_{(x^{(0)})}$$

und zeigt leicht, daß die partielle Derivirte nach x_{ν} $\frac{\partial \mathfrak{P}}{\partial x_{\nu}}$ aus \mathfrak{P} hervorgeht, indem man an Stelle $x_{\nu}^{\mu_{\nu}} \mu_{\nu} x_{\nu}^{\mu_{\nu}-1}$ setzt.

Durch denselben Ableitungsproceß kann man die Ableitungen aller Ordnungen

$$\frac{\partial^{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n} \mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1^{\mu_1} \partial x_2^{\mu_2} \dots \partial x_n^{\mu_n}}$$

gewinnen, die von der Anordnung der Processe unabhängig sind. Der Werth dieser Ableitung $(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n)$ ter Ordnung an der Stelle (0) ist bis auf den Factor

$$\mu_1! \mu_2! \dots \mu_n!$$

gleich $a_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}$ und darum kann man die gegebene Reihe auf die Form bringen:

$$\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{(\mu_v)=0}^{\infty} \left(\frac{\partial^{\mu_1+\mu_2+\dots+\mu_n} \mathfrak{P}}{\partial x_1^{\mu_1} \partial x_2^{\mu_2} \dots \partial x_n^{\mu_n}} \right)_{(0)} \frac{x_1^{\mu_1}}{\mu_1!} \frac{x_2^{\mu_2}}{\mu_2!} \dots \frac{x_n^{\mu_n}}{\mu_n!},$$

und die Reihe für $\mathfrak{P}(x_1^{(0)} + h_1, x_2^{(0)} + h_2, \dots, x_n^{(0)} + h_n)$ erhält die Gestalt

$$\sum_{(\mu_v)=0}^{\infty} \left(\frac{\partial^{\mu_1+\mu_2+\dots+\mu_n} \mathfrak{P}}{\partial x_1^{\mu_1} \partial x_2^{\mu_2} \dots \partial x_n^{\mu_n}} \right)_{(0)} \frac{h_1^{\mu_1}}{\mu_1!} \frac{h_2^{\mu_2}}{\mu_2!} \dots \frac{h_n^{\mu_n}}{\mu_n!}.$$

Setzt man an Stelle von h_v $x_v - x_v^{(0)}$, so wird

$$\mathfrak{P}(x_1^{(0)} + (x_1 - x_1^{(0)}), x_2^{(0)} + (x_2 - x_2^{(0)}), \dots, x_n^{(0)} + (x_n - x_n^{(0)}))$$

oder bei der früheren analogen Bezeichnungsweise

$$\begin{aligned} & \mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n | (x^{(0)})) \\ &= \sum_{(\mu_v)=0}^{\infty} \left(\frac{\partial^{\mu_1+\mu_2+\dots+\mu_n} \mathfrak{P}}{\partial x_1^{\mu_1} \partial x_2^{\mu_2} \dots \partial x_n^{\mu_n}} \right)_{(x^{(0)})} \frac{(x_1 - x_1^{(0)})^{\mu_1}}{\mu_1!} \frac{(x_2 - x_2^{(0)})^{\mu_2}}{\mu_2!} \dots \frac{(x_n - x_n^{(0)})^{\mu_n}}{\mu_n!}. \end{aligned}$$

An allen Stellen des Convergencebereiches dieser abgeleiteten Reihe, soweit er mit dem der gegebenen Reihe übereinkommt, geben beide Reihen dieselben Werthe, denn daselbst ist die durch die Substitutionen

$$x_v^{(0)} + (x_v - x_v^{(0)}) \quad \text{für } x_v$$

hervorgehende neue Reihe nur eine identische Umformung von

$$\sum_{(\mu_n)=0}^{\infty} a_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} (x_1^{(0)} + (x_1 - x_1^{(0)}))^{\mu_1} (x_2^{(0)} + (x_2 - x_2^{(0)}))^{\mu_2} \dots (x_n^{(0)} + (x_n - x_n^{(0)}))^{\mu_n}.$$

§ 32. Beziehung zwischen den aus einer ersten Reihe abgeleiteten Reihen. Obere und untere Grenze der Convergenzradien der abgeleiteten Reihen.

Räumen wir der Reihe

$$\mathfrak{P}(x|a) = \sum_{v=0}^{\infty} c_v (x-a)^v$$

die Rolle einer primitiven ein, so gelten für diese zunächst folgende Sätze: Eine Potenzreihe $\mathfrak{P}(x-a)$, die für unendlich viele Stellen einer Punktmenge mit der Häufungsstelle a verschwindet, ist identisch Null. Zwei nach Potenzen von $x-a$ fortschreitende Reihen sind identisch, wenn sie an unendlich vielen Stellen $(x_1, x_2, \dots, x_n, \dots)$ mit der Häufungsstelle a dieselben Werthe annehmen. Ferner besitzt die Potenzreihe $\mathfrak{P}(x-a)$ in ihrem ganzen Convergencebereiche den Werth A , wenn sie an unendlich vielen Stellen jeder (noch so kleinen) Umgebung von a den Werth A annimmt.

Ist a_1 eine Stelle in dem Convergenzkreise R unserer Reihe und ersetzen wir

$$x - a \text{ durch } a_1 - a + (x - a_1),$$

ordnen die entstehende Reihe

$$\sum_{v=0}^{\infty} c_v (a_1 - a + (x - a_1))^v$$

nach Potenzen von $x - a_1$, so geht eine Reihe

$$\mathfrak{P}_1(x|a_1) = \sum_{v=0}^{\infty} c_v^{(1)} (x - a_1)^v$$

hervor, in welcher die Coefficienten $c_n^{(1)}$ in folgender Weise zu definiren sind:

$$\begin{aligned} c_n^{(1)} &= \frac{1}{n!} \left(\mathfrak{P}^{(n)}(x - a) \right)_{x=a_1} = \frac{1}{n!} \left(\frac{d^n \mathfrak{P}(x - a)}{dx^n} \right)_{x=a_1} = \\ &= \frac{1}{n!} \sum_{v=n}^{\infty} v(v-1) \dots (v-n+1) c_v (a_1 - a)^{v-n}. \end{aligned}$$

Die neue aus $\mathfrak{P}(x|a)$ *abgeleitete Reihe* $\mathfrak{P}_1(x|a_1)$ bezeichnen wir, um ihre Entstehung anzudeuten, mit

$$\mathfrak{P}(x|a, a_1).$$

Sie convergirt mindestens so lange als

$$|x - a_1| < R - |a_1 - a| = R - d_1$$

und gibt in der Umgebung $R - d_1$ von a_1 dieselben Werthe wie $\mathfrak{P}(x|a)$.

Bezeichnet a_2 eine Stelle in dem Convergenzbereiche von

$$\mathfrak{P}(x|a, a_1)$$

und setzt man von Neuem anstatt

$$x - a_1 \quad a_2 - a_1 + (x - a_1),$$

so entsteht abermals eine neue Reihe:

$$\mathfrak{P}_2(x|a_2) = \mathfrak{P}_1(x|a_1, a_2) = \mathfrak{P}(x|a, a_1, a_2) = \sum_{v=0}^{\infty} c_v^{(2)} (x - a_2)^v,$$

deren Coefficienten

$$c_n^{(2)} = \frac{1}{n!} \left(\frac{d^n \mathfrak{P}(x|a, a_1)}{dx^n} \right)_{x=a_2} \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

sind. Ist der Convergenzradius von $\mathfrak{P}(x|a, a_1)$ R_1 , so convergirt $\mathfrak{P}(x|a, a_1, a_2)$ gewiß für die durch die Bedingung

$$|x - a_2| < R_1 - |a_2 - a_1|$$

definirten Stellen.

Setzt man dieses Verfahren fort, wählt eine Stelle a_3 in dem Convergenzkreise von $\mathfrak{P}(x|a, a_1, a_2)$ und bildet $\mathfrak{P}(x|a, a_1, a_2, a_3)$

usw., wählt a_v in dem Convergenzkreise von $\mathfrak{P}_{v-1}(x - a_{v-1})$, so folgt endlich eine Reihe:

$$\mathfrak{P}_n(x - a_n) = \mathfrak{P}(x|a, a_1, a_2, \dots, a_n),$$

die man eine *durch Vermittlung der Stellen* a_1, a_2, \dots, a_n aus $\mathfrak{P}(x|a)$ *abgeleitete Reihe* nennt.

Liegt die Stelle a_1 in dem Kreise R um a , a_2 in dem Kreise $R - |a_1 - a| = R_1$ um a_1 , a_3 in der Umgebung $R_1 - |a_2 - a_1| = R_2$ von a_2 usw., endlich a_n in dem Kreise $R_{n-1} - |a_{n-1} - a_{n-2}| = R_n$ von a_{n-1} , so wird

$$|a_v - a| < R \quad (v = 1, 2 \dots n),$$

und daher gibt es auch eine *direct ableitbare Reihe nach Potenzen von* $(x - a_n)$ $\mathfrak{P}(x|a_n)$, die mit $\mathfrak{P}(x|a, a_1, a_2, \dots, a_n)$ *identisch ist*.

Wir beweisen diese Behauptung für den Fall $n = 2$.

Die Reihen $\mathfrak{P}(x|a)$ und $\mathfrak{P}(x|a, a_1)$ stimmen an allen Stellen der Umgebung R_2 von a_2 überein, d. h. sie nehmen dort dieselben Werthe an, ebenso $\mathfrak{P}(x|a, a_1)$ und $\mathfrak{P}(x|a, a_1, a_2)$ und folglich auch $\mathfrak{P}(x|a)$ und $\mathfrak{P}(x|a, a_1, a_2)$. Die Reihen $\mathfrak{P}(x|a)$ und $\mathfrak{P}(x|a, a_2)$ besitzen aber an allen Stellen des Kreises $R - |a_2 - a|$ um a_2 ebenfalls dieselben Werthe und nun ist klar, daß die beiden Reihen $\mathfrak{P}(x|a, a_1, a_2)$ und $\mathfrak{P}(x|a, a_2)$ an unendlich vielen Stellen jeder Umgebung von a_2 übereinstimmen, und es wird in der That

$$\mathfrak{P}(x|a, a_2) \equiv \mathfrak{P}(x|a, a_1, a_2),$$

und allgemein

$$\mathfrak{P}(x|a, a_n) \equiv \mathfrak{P}(x|a, a_1, a_2, \dots, a_n).$$

Aus diesem Satze geht gleichzeitig hervor, daß der wahre Convergenzkreis einer aus $\mathfrak{P}(x|a, a_1)$ abgeleiteten Reihe $\mathfrak{P}(x|a, a_1, a_2)$ den Convergenzkreis von $\mathfrak{P}(x|a, a_1)$ keineswegs von innen berühren muß, denn der Convergenzradius von $\mathfrak{P}(x|a, a_2)$ ist zum mindesten

$$R - |a_2 - a|,$$

und er wird größer sein als

$$R_2 = R_1 - |a_2 - a_1| = R - |a_1 - a| - |a_2 - a_1|,$$

wenn

$$|a_2 - a_1| > |a_2 - a| - |a_1 - a|,$$

und ebenso wird der Convergenzbereich von $\mathfrak{P}(x|a, a_1)$ nicht in dem Kreise R um a liegen müssen. Wir konnten eben nur beweisen, daß er mindestens bis an den Kreis R heranreicht. Es wird uns alsbald gelingen, ein Kriterium für die wahre Convergenzgrenze zu erkennen.

Zunächst zeigen wir: *Wenn man aus* $\mathfrak{P}(x|a)$ *eine Reihe* $\mathfrak{P}(x|a, b)$ *direct abzuleiten vermag, so kann man umgekehrt auch* $\mathfrak{P}(x|a)$ *aus* $\mathfrak{P}(x|a, b)$ *ableiten.*

Falls die Stelle a dem Convergenzbereiche der Reihe $\mathfrak{P}(x|a, b)$ an-

gehört, so ist $\mathfrak{P}(x|a, b, a)$ eine direct ableitbare Reihe, die für jeden Werth x einer hinlänglich kleinen Umgebung von a mit $\mathfrak{P}(x|a, b)$ und mit $\mathfrak{P}(x|a)$ übereinstimmt, folglich ist

$$\mathfrak{P}(x|a, b, a) = \mathfrak{P}(x|a)$$

und $\mathfrak{P}(x|a)$ ist wirklich aus $\mathfrak{P}(x|a, b)$ abgeleitet.

Gehört aber die Stelle a dem Convergenzbereiche von $\mathfrak{P}(x|a, b)$ nicht an, so kann man eine Reihe vermittelnder Stellen

$$b_1, b_2, \dots b_n$$

angeben, von denen b_1 in dem Convergenzbereiche von $\mathfrak{P}(x|a, b)$ und a näher liegt als die Stelle b , b_2 dem Convergenzbereiche von $\mathfrak{P}(x|a, b, b_1)$ angehört und a näher liegt als die Stelle b_1 usw., dann wird schliesslich die Reihe $\mathfrak{P}(x|a, b_1, b_2, \dots b_n)$ an der Stelle a convergiren. Die Convergenzbereiche der hier successive abgeleiteten Reihen enthalten stets Stellen, die in dem Convergenzbereiche der vorangehenden Reihe nicht vorkommen und darum kann man auch schliesslich eine Reihe

$$\mathfrak{P}(x|a, b_1, b_2, \dots b_n, a)$$

ableiten, die mit $\mathfrak{P}(x|a)$ identisch sein wird, weil $\mathfrak{P}(x|a, b_1, \dots b_n)$ in einer gewissen Umgebung von a mit $\mathfrak{P}(x|a)$ übereinstimmt. —

Sind zwei Potenzreihen

$$\mathfrak{P}(x|a), \mathfrak{P}_1(x|b)$$

gegeben, deren Convergenzbereiche theilweise zusammenfallen, und besitzen sie an unendlich vielen Stellen jeder Umgebung des dem gemeinsamen Bereiche angehörigen Punktes c dieselben Werthe, so lassen sich die Reihen aus einander ableiten und haben an allen Stellen des gemeinsamen Bereiches dieselben Werthe.

Der Voraussetzung zufolge ist

$$\mathfrak{P}(x|a, c) = \mathfrak{P}_1(x|b, c)$$

und weil $\mathfrak{P}(x|a)$ aus $\mathfrak{P}(x|a, c)$, $\mathfrak{P}_1(x|b)$ aus $\mathfrak{P}_1(x|b, c)$ abzuleiten ist, geht auch $\mathfrak{P}_1(x|b)$ durch Vermittlung von a und einer Reihe von Stellen $b_1, b_2, \dots b_n$ aus $\mathfrak{P}(x|a)$ und umgekehrt $\mathfrak{P}(x|a)$ durch Vermittlung von c und einer Reihe von Stellen $a_1, a_2, \dots a_n$ aus $\mathfrak{P}_1(x|b)$ hervor.

Ist c' eine Stelle in dem gemeinsamen Convergenzbereiche (A) der gegebenen Reihen, an welcher die Übereinstimmung von $\mathfrak{P}(x|a)$ und $\mathfrak{P}_1(x|b)$ noch nicht bekannt ist, so wähle man innerhalb (A) eine Reihe vermittelnder Stellen $c_1, c_2, \dots c_m$ derart, daß c_μ dem um $c_{\mu-1}$ zu verzeichnenden Kreise angehört, der innerhalb (A) Platz findet, so wird

$$\mathfrak{P}(x|a, c, c_1, \dots c_m, c') = \mathfrak{P}_1(x|b, c, c_1, \dots c_m, c')$$

und

$$\mathfrak{P}(x|a, c') = \mathfrak{P}_1(x|b, c'),$$

denn es gilt zunächst

$\mathfrak{P}(x|a, c, c_1) \equiv \mathfrak{P}(x|a, c_1), \quad \mathfrak{P}(x|b, c, c_1) \equiv \mathfrak{P}_1(x|b, c_1)$
und wegen der Identität

$$\mathfrak{P}(x|a, c, c_1) \equiv \mathfrak{P}(x|b, c, c_1)$$

mufs

$$\mathfrak{P}(x|a, c_1) \equiv \mathfrak{P}(x|b, c_1)$$

sein usw. —

Heifst der wahre Convergenzradius einer Reihe $\mathfrak{P}(x-a)$ R und ist a_1 eine dem Convergenzbereiche angehörige Stelle in der Entfernung $d = |a_1 - a|$ von a , wobei $d < \frac{R}{2}$ sein mag, so ist der Convergenzradius R_1 von $\mathfrak{P}(x|a, a_1)$ gewifs nicht kleiner als $R - d$, d. h. gröfser als $\frac{R}{2}$, und dann liegt a in dem Convergenzkreise der abgeleiteten Reihe. Weil man hierauf $\mathfrak{P}(x|a)$ wieder aus $\mathfrak{P}(x|a, a_1)$ ableiten kann, ist R nicht kleiner als $R_1 - d$, und somit besitzt der Radius der abgeleiteten Reihe die Grenzen

$$R - d \quad \text{und} \quad R + d.$$

Wählt man die Stelle a_1 in einer Entfernung d von a , die gröfser ist als $\frac{R}{2}$, so bleiben diese Grenzen für R_1 erhalten; die untere Grenze ganz offenbar und die obere Grenze darum, weil man andernfalls aus $\mathfrak{P}(x|a, a_1)$ eine Reihe

$$\mathfrak{P}(x|a, a_1, b_1, b_2, \dots b_n, a)$$

ableiten könnte, die mit $\mathfrak{P}(x|a)$ übereinstimmt, aber nicht den angenommenen Convergenzradius R hat.

Weil d die obere Grenze R besitzt, sind die Grenzen der Convergenzradien aller abgeleiteten Potenzreihen

$$0 \quad \text{und} \quad 2R.$$

Der wahre Convergenzradius R einer Potenzreihe $\mathfrak{P}(x-a)$ ist geradezu dadurch charakterisirt, dafs die untere Grenze der Convergenzradien der abgeleiteten Reihen Null ist, das will sagen: wenn die untere Grenze nicht Null ist, so ist der Convergenzradius nicht R , sondern gröfser als R .

Um das zu beweisen, setzen wir als bekannt voraus, dafs eine gegebene Reihe

$$\mathfrak{P}(x) = \sum_{v=0}^{\infty} c_v x^v$$

für alle Stellen a der Umgebung R von $x = 0$ convergire, dann ist für alle der Bedingung

$$|a| + |x| < R$$

genügenden Werthe von x und a die Reihe

$$\mathfrak{P}(x-a) = \mathfrak{P}(a) + \mathfrak{P}'(a) \frac{x-a}{1} + \mathfrak{P}^{(2)}(a) \frac{(x-a)^2}{1 \cdot 2} + \dots$$

convergent. Ferner sei die untere Grenze der Convergenzradien dieser für alle Stellen der Umgebung R von $x=0$ abgeleiteten Reihen nicht Null, sondern r . Wir wollen zeigen, daß in diesem Falle die Reihe $\mathfrak{P}(x)$ den wahren Convergenzradius $R+r$ besitzt.

Es sei $\varrho < r$ und x' eine Stelle in dem durch die Radien R und $R+\varrho$ definirten Kreisringe um die Stelle $x=0$, also:

$$R < |x'| < R + \varrho,$$

dann hat der durch die Bedingung

$$|x - x'| < r$$

definirte Bereich um die Stelle x' mit der Umgebung R von $x=0$ einen Bereich (A) gemein und zu einer Stelle a in diesem letzteren gehört eine Reihe $\mathfrak{P}(x|a)$, deren Convergenzradius nicht kleiner ist als r . Der Kreis r um a enthält die Stelle x' und $\mathfrak{P}(x'|a)$ hat einen bestimmten Werth.

Ist b eine zweite Stelle innerhalb (A) , so hat auch $\mathfrak{P}(x'|b)$ einen bestimmten Werth. Weil aber die um die Stelle

$$c = \frac{1}{2}(a+b)$$

giltigen Reihen $\mathfrak{P}(x|a, c)$ und $\mathfrak{P}(x|b, c)$ mit $\mathfrak{P}(x|c)$ und somit untereinander übereinstimmen, so nehmen die Reihen $\mathfrak{P}(x|a)$ und $\mathfrak{P}(x|b)$ an allen Stellen ihres gemeinsamen Convergenzbereiches und auch an der Stelle $x = x'$ dieselben Werthe an, es ist also

$$\mathfrak{P}(x'|a) = \mathfrak{P}(x'|b).$$

Jetzt ergibt sich leicht, daß die gegebene Reihe $\mathfrak{P}(x)$ auch noch für $x = x'$ convergirt.

Die Reihe $\mathfrak{P}(x|a)$ ist der Voraussetzung nach convergent, wenn

$$|a| < R \quad \text{und} \quad |x - a| < r.$$

Bezeichnet dann g die obere Grenze der Werthe $|\mathfrak{P}(x|a)|$ für alle Stellen der Kreislinie $|x - a| = \varrho$, so ist

$$\frac{1}{\nu!} |\mathfrak{P}^{(\nu)}(a)| = \frac{1}{\nu!} \left| \sum_{\mu=\nu}^{\infty} \mu(\mu-1) \cdots (\mu-\nu+1) c_{\mu} a^{\mu-\nu} \right| \leq g \varrho^{-\nu},$$

und hierauf

$$\frac{\mu(\mu-1) \cdots (\mu-\nu+1)}{1 \cdot 2 \cdots \nu} |c_{\mu}| \leq g \varrho^{-\nu} |a^{-(\mu-\nu)}|$$

oder

$$\binom{\mu}{\nu} |c_{\mu}| |a^{\mu}| \left(\frac{\varrho}{R}\right)^{\nu} \leq g \frac{|a^{\nu}|}{R^{\nu}}.$$

Bezeichnet man $|a|$ mit α und bildet die Summe

$$\sum_{\nu=0}^{\mu} \binom{\mu}{\nu} |c_{\mu}| \alpha^{\mu} \left(\frac{\varrho}{R}\right)^{\nu} = \alpha^{\mu} |c_{\mu}| \left(1 + \frac{\varrho}{R}\right)^{\mu},$$

so ist diese wegen der letzten Ungleichung

$$\leq g \frac{1 - \left(\frac{\alpha}{R}\right)^\mu}{1 - \left(\frac{\alpha}{R}\right)} < \frac{gR}{R - \alpha},$$

und wenn somit die Größen

$$|c_\mu| \left(\alpha + \frac{\alpha\varrho}{R}\right)^\mu$$

für jedes μ kleiner bleiben als eine angebbare Gröfse, muß die Reihe

$$\mathfrak{P}(x) = \sum_{\mu=0}^{\infty} c_\mu x^\mu$$

für alle Werthe von x , deren absoluter Betrag

$$|x| < \alpha + \frac{\alpha\varrho}{R}$$

convergiren. Da α dem Werthe R beliebig nahe kommen kann, wird der Convergenzradius von $\mathfrak{P}(x)$ wirklich gröfser als R und wird von $R + \varrho$ und $R + r$ beliebig wenig abweichen. Dann muß er aber gleich $R + r$ sein, denn der Convergenzradius kann seiner Natur zufolge einer oberen Grenze nicht bloß beliebig nahe kommen, sondern er hat ein Maximum.

Es sei nunmehr R der wahre Convergenzradius einer Potenzreihe um die Stelle 0 oder a oder ∞ — sie heiße

$$\mathfrak{P}(x), \quad \mathfrak{P}(x-a), \quad \mathfrak{P}(x-\infty) = \mathfrak{P}\left(\frac{1}{x}\right)$$

— dann haben die Convergenzradien der abgeleiteten Reihen nothwendig die Null zur unteren Grenze. Es existirt deshalb eine Stelle, in deren noch so kleinen Umgebungen Stellen der Beschaffenheit liegen, daß die ihnen zugehörigen abgeleiteten Reihen einen Convergenzradius besitzen, welcher kleiner ist als eine beliebig kleine Gröfse. Diese Stelle kann nicht im Innern des Convergenzkreises der vorgegebenen Reihe und muß daher auf der Begrenzung liegen.

Wir können noch sagen, daß es auf der wahren Grenze eines Convergenzbereiches mindestens eine Stelle c geben muß, in deren Umgebung keine Potenzreihe $\mathfrak{P}'(x|c)$ existirt, die an den Stellen des dieser und der gegebenen Reihe gemeinsamen Convergenzbereiches mit der letzteren übereinstimmt, denn gäbe es für jeden Punkt der Begrenzung eine solche Reihe, so könnten die Convergenzradien der aus der ursprünglichen abgeleiteten Reihen nicht die untere Grenze Null haben. Die Anzahl solch ausgezeichnete Punkte c kann endlich oder unendlich sein, ja es ist denkbar, daß alle Stellen der Begrenzung eines Convergenzbereiches von der genannten Art sind. Wenn eine unendliche Menge von Punkten c auf dem Convergenzkreise liegt, sind die Stellen der abgeleiteten Punktmenge Stellen gleicher Art, denn diese sind dadurch definirt, daß in jeder Umgebung derselben unend-

lich viele der gegebenen Stellen liegen. Die Stellen, in deren Umgebung keine Potenzreihen existiren, welche mit der gegebenen Reihe an den Stellen des gemeinsamen Convergencebereiches übereinstimmen, constituiren somit eine abgeschlossene Punktmenge.

Die den letzten entsprechenden Betrachtungen über die Potenzreihe mehrerer Variabeln

$$\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a))$$

fassen wir kurz zusammen.

Man kann durch die Substitutionen

$$a'_\nu = a_\nu + (x_\nu - a'_\nu) \quad (\nu = 1, 2, \dots n),$$

wo (a') eine Stelle in dem durch die Ungleichungen

$$|x_\nu - a_\nu| < R \quad (\nu = 1, 2, \dots n)$$

charakterisirten Convergencebereiche der gegebenen Reihe ist, vor Allem neue Potenzreihen

$$\mathfrak{P}_1(x_1, x_2, \dots x_n | (a')) \quad \text{oder} \quad \mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a); (a'))$$

ableiten. Der Coefficient $a'_{\mu_1, \mu_2, \dots \mu_n}$ der Reihe

$$\begin{aligned} & \mathfrak{P}_1(x_1, x_2, \dots x_n | (a')) \\ &= \sum_{(\mu_\nu)=0}^{\infty} a'_{\mu_1, \mu_2, \dots \mu_n} (x_1 - a'_1)^{\mu_1} (x_2 - a'_2)^{\mu_2} \dots (x_n - a'_n)^{\mu_n} \end{aligned}$$

ist der Werth der Ableitung

$$\frac{\partial^{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n} \mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a))}{\partial x_1^{\mu_1} \partial x_2^{\mu_2} \dots \partial x_n^{\mu_n}}$$

an der Stelle (a') .

Wählt man in dem Convergencebereiche der abgeleiteten Reihe mit dem Radius R_1 eine Stelle (a'') und liegt diese in dem Convergencebereiche von \mathfrak{P} , so gibt es eine indirect und eine direct abgeleitete Reihe

$\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a), (a'), (a''))$ und $\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a), (a''))$, die wieder identisch sind.

Fallen die Convergencebereiche zweier Potenzreihen

$$\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a)), \quad \mathfrak{P}_1(x_1, x_2, \dots x_n | (b))$$

theilweise zusammen und stimmen sie an unendlich vielen Stellen, welche eine Häufungsstelle (c) haben, überein, so werden die Potenzreihen

$$\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a), (c)), \quad \mathfrak{P}_1(x_1, x_2, \dots x_n | (b), (c))$$

identisch und die gegebenen Reihen stimmen an allen Stellen des gemeinsamen Convergencebereiches (A) überein, in deren Umgebungen aus $\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a), (c))$ abgeleitete Reihen existiren.

Bezeichnet man den Convergenzradius von $\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a), (c))$ mit ϱ und wählt man eine Stelle (c') so, daß

$$|c_v - c'_v| < \varrho \quad (v = 1, 2, \dots n),$$

so werden die gegebenen Reihen jedenfalls an allen Stellen derjenigen Umgebung von (c') übereinstimmen, welche dem Bereiche (A) und dem Convergencebereich von $\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a), (c), (c'))$ angehören. So fortfahrend findet man ein $2n$ fach ausgedehntes Continuum, wo die Reihen \mathfrak{P} und \mathfrak{P}_1 übereinstimmen.

Ist der wahre Convergencebereich einer Potenzreihe wieder durch die Gesammtheit der den Bedingungen folgender Art

$$|x_v - a_v| < R \quad (v = 1, 2, \dots n)$$

genügenden Werthsysteme (x) definirt, für welche $\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a))$ convergirt, indeß die Reihe für jedes Werthesystem:

$$|x_v - a_v| > R \quad (v = 1, 2, \dots n)$$

divergirt, so muß er dadurch charakterisirt sein, daß unter den Stellen (x) , für die

$$|x_v - a_v| = R \quad (v = 1, 2, \dots n)$$

ist, mindestens eine existirt, in deren Umgebung keine Potenzreihe $\mathfrak{P}'(x_1, x_2, \dots x_n | (c))$ aufzustellen ist, die an den Punkten des dieser und der gegebenen Reihe gemeinsamen Convergencebereiches mit der letzteren übereinstimmt.

Die untere Grenze der Convergencegraden der abgeleiteten Reihen ist Null.

II. Abschnitt.

Begriff der monogenen analytischen Function.

Allgemeine Eigenschaften der analytischen Function einer Variabeln.

§ 33. Definition der monogenen analytischen Function.

Überblicken wir die Sätze über die convergenten Potenzreihen einer Variabeln $\mathfrak{P}(x - a)$, so ist vor Allem hervorzuheben, daß der Convergencebereich (A) ein Kreis um die Stelle a ist, an dessen Stellen die Reihe einen bestimmten endlichen Werth annimmt, stetig ist und Ableitungen aller Ordnungen besitzt. Jede Ableitung $\mathfrak{P}^{(n)}(x - a)$ ist innerhalb des Convergencekreises der gegebenen Reihe convergent.

Darnach verhält sich eine Potenzreihe dort, wo sie eine Bedeutung

hat, wie eine ganze rationale Function in dem endlichen Bereiche der Variablen.

Greift man in dem Convergenzkreise irgend eine Stelle b heraus, so kann man aus $\mathfrak{P}(x|a)$ eine nach Potenzen von $(x - b)$ fortschreitende Potenzreihe $\mathfrak{P}(x|a, b)$ in bestimmter Weise ableiten. Ihr Convergenzkreis um die Stelle b kann entweder ganz dem Convergenzbereiche der Reihe $\mathfrak{P}(x|a)$ angehören und berührt dann die Grenze des letzteren, oder aber er kann Stellen c der Begrenzung von (A) enthalten, und dann enthält er auch Stellen, die außerhalb (A) liegen. An den Stellen des beiden Reihen gemeinsamen Convergenzbereiches nehmen $\mathfrak{P}(x|a)$ und $\mathfrak{P}(x|a, b)$ dieselben Werthe an. Wenn daher der Convergenzbereich von $\mathfrak{P}(x|a, b)$ nicht über den von $\mathfrak{P}(x|a)$ hinausragt, so nimmt die abgeleitete Reihe keine Werthe an, die nicht auch die primitive gibt. Andernfalls heisst die abgeleitete Reihe eine *Fortsetzung* der ersten. Weil $\mathfrak{P}(x|a)$ auch aus $\mathfrak{P}(x|a, b)$ abzuleiten ist, ist umgekehrt $\mathfrak{P}(x|a)$ eine Fortsetzung von $\mathfrak{P}(x|a, b)$.

Bezeichnet c eine Stelle auf der Begrenzung des Bereiches (A) und enthält der Convergenzkreis der Fortsetzung $\mathfrak{P}(x|a, b)$ diese Stelle, so gibt es auch eine nach Potenzen von $(x - c)$ fortschreitende Reihe $\mathfrak{P}(x|a, b, c)$, die an den Stellen des dieser und der Reihe $\mathfrak{P}(x|a)$ gemeinsamen Convergenzbereiches dieselben Werthe hat wie die primitive Reihe.

Darum kann der Convergenzkreis von $\mathfrak{P}(x|a, b)$ nicht alle Grenzstellen des Bereiches (A) enthalten, denn sonst gäbe es in der Umgebung jeder solchen Stelle c eine Reihe $\mathfrak{P}(x|a, b, c)$, die im Innern des dem Bereiche (A) und dem eigenen Convergenzkreise angehörigen Gebietes mit $\mathfrak{P}(x|a)$ übereinstimmt, und das ist nicht möglich, wenn (A) der wahre Convergenzbereich der gegebenen Reihe ist.

Man sieht also, daß die ausgezeichneten Stellen der wahren Convergenzgrenze von (A) , in deren Umgebung keine durch Vermittlung einer Stelle b aus $\mathfrak{P}(x|a)$ abgeleitete Reihe existirt, auch solch ausgezeichnete Stellen abgeleiteter Reihen $\mathfrak{P}(x|a, b)$ sein werden und offenbar wird der Convergenzkreis von $\mathfrak{P}(x|a, b)$ durch die der Stelle b nächstliegende Stelle der genannten Art auf der Begrenzung von (A) gehen müssen. Man nennt diese Stellen *singuläre*.

Aus den Reihen $\mathfrak{P}(x|a, b)$ kann man neue ableiten. Die Gesamtheit der aus der ursprünglichen direct und indirect ableitbaren Reihen stehen in derartigem Zusammenhang, daß aus jeder Reihe jede andere abzuleiten ist, wornach jede die Rolle der ersten übernehmen kann. Man sagt:

Die Gesamtheit der aus einer gegebenen Reihe ableitbaren und in einander fortsetzbaren Potenzreihen constituirt eine monogene analytische Function.

Die einzelne Reihe heisst *ein Element der Function* und durch ein Element ist die Function vollständig defnirt, denn man kann alle Fortsetzungen desselben ableiten.

Ist x_0 irgend eine Stelle im Bereiche der unbeschränkten Variablen und kann man aus einem primitiven Elemente $\mathfrak{P}(x|a)$ eine Reihe ableiten, deren Convergenzkreis die Stelle x_0 enthält, so nennt man den Werth der neuen Reihe für $x = x_0$ den Werth der durch $\mathfrak{P}(x|a)$ definirten Function an der Stelle x_0 . Indem es aber dann eine nach Potenzen von $(x - x_0)$ fortschreitende Reihe gibt, ist der Werth der Function für $x = x_0$ auch als das Anfangsglied dieser Reihe $\mathfrak{P}_1(x|x_0)$ zu definiren.

Wenn der Convergenzbereich jeder aus dem primitiven Elemente $\mathfrak{P}(x|a)$ abgeleiteten Reihe ganz dem Convergenzkreise dieses Elementes angehört, so stellt dasselbe allein eine analytische Function dar, d. h. die arithmetische Abhängigkeit des Werthes der Function von dem der Variablen ist durch die Reihe $\mathfrak{P}(x|a)$ allein ausgedrückt, denn die abgeleiteten Reihen nehmen keine Werthe an, die nicht auch jene besitzt. Ist b eine Stelle in dem Convergenzbereiche von $\mathfrak{P}(x|a)$, so wird

$$[\mathfrak{P}(x|a, b)]_{x=b} = \mathfrak{P}(b|a).$$

Hat hingegen das primitive Element $\mathfrak{P}(x|a)$ Fortsetzungen, so wird die durch dasselbe definirte Function durch die Gesammtheit ihrer Elemente dargestellt.

Den Übergang von dem gegebenen Elemente $\mathfrak{P}(x|a)$ zu einer Reihe $\mathfrak{P}_1(x|x_0)$ kann man auf unendlich verschiedene Weise durch Vermittlung verschiedener Stellen bewerkstelligen. Gelangt man auf den unendlich vielen von a nach x_0 führenden continuirlichen Wegen in dem Bereiche der Variablen x und in dem Convergenzbereiche der Gesammtheit von Elementen stets zu derselben Reihe, so hat die Function an der Stelle x_0 einen Werth; besitzt sie an jeder Stelle, in deren Umgebung überhaupt Potenzreihen existiren, welche in $\mathfrak{P}(x|a)$ fortzusetzen sind, nur einen Werth, so heisst sie eine *eindeutige analytische Function*. Die durch ein einziges Element vollständig dargestellte analytische Function ist darnach gewiss eindeutig.

Erhält man bei den verschiedenen Übergängen eine endliche Anzahl oder unendlich viele von einander verschiedene Elemente

$$\mathfrak{P}_\nu(x|x_0) \quad (\nu = 1, 2, 3, \dots),$$

so heisst die durch $\mathfrak{P}(x|a)$ definirte monogene analytische Function viel- oder *mehrdeutig*, und zwar endlich oder unendlich vieldeutig. Die Function hat an der Stelle x_0 so viel Werthe, als es Elemente $\mathfrak{P}_\nu(x|x_0)$ gibt und dabei wird ein Werth mehrfach gezählt, wenn die Anfangsglieder mehrerer Elemente $\mathfrak{P}_\nu(x|x_0)$ gleich sind. — In dem

gemeinsamen Convergenzbereiche zweier Elemente können aber nicht unendlich viele Stellen mit der Häufungsstelle x_0 liegen, für welche die Elemente gleiche Werthe haben, sonst wären sie identisch.

Setzt man, von dem gemeinsamen Convergenzbereiche der n Elemente einer n -deutigen Function ausgehend, die gegebenen Reihen $\mathfrak{P}_\nu(x|x_0)$ durch Vermittlung derselben Stellen nach x_1 fort, so heißen die n nothwendig wieder von einander verschiedenen Elemente

$$\mathfrak{P}_\nu(x|x_0, a_1, a_2, \dots, a_m, x_1)$$

simultane Elemente der n -deutigen Function und die Werthe der Anfangsglieder dieser Reihen *simultane Functionswerthe*.

§ 34. Allgemeine Betrachtungen über die eindeutigen analytischen Functionen.

Die Gesammtheit der Stellen x_0 , in deren Umgebung die durch ein primitives Element definirte eindeutige Function $f(x)$ durch eine Potenzreihe dargestellt ist, heiße der *Stetigkeitsbereich der Function*. Dieser Bereich ist nothwendig begrenzt, d. h. es gibt Stellen, in deren Umgebung keine aus dem primitiven Elemente $\mathfrak{P}(x|a)$ ableitbare Potenzreihe existirt, und zwar darum, weil jedes Element mindestens eine solch singuläre Stelle auf der Grenze seines Convergenzbereiches besitzt und die singuläre Stelle c des einzelnen Elementes singuläre Stelle derjenigen Fortsetzungen bleibt, welche Stellen der kleinsten Umgebung von c in ihrem Convergenzbereiche enthalten. Ob die Reihe $\mathfrak{P}_1(x|x')$ direct oder indirect aus $\mathfrak{P}(x|a)$ abgeleitet ist, die Stelle c kann nicht in ihrem Convergenzkreise liegen, sonst gäbe es auch eine Reihe $\mathfrak{P}_1(x|c)$, die an unendlich vielen Stellen mit $\mathfrak{P}(x|a)$ übereinstimmt.

Die Grenzstellen des Stetigkeitsbereiches der eindeutigen Function können eine *isolirte* Punktmenge bilden oder eine Punktmenge der Beschaffenheit, daß in jeder Umgebung jeder Stelle unendlich viele andere Grenzstellen liegen, oder endlich Punktmenge, die aus Mengen der genannten Arten zusammengesetzt sind, sie können aber niemals ein zweifach ausgedehntes Continuum constituiren, denn sie sind singuläre Stellen ihrer Elemente, und darum gibt es in jeder Umgebung einer Grenzstelle auch Stellen, in deren Umgebung ein Element der Function existirt. Die in Rede stehenden Grenzstellen nennt man *singuläre Stellen der Function*.

Die Gesammtheit P der singulären Stellen c einer eindeutigen analytischen Function bildet auch eine abgeschlossene Menge (die ihre abgeleitete Punktmenge P' enthält), denn eine Stelle c' , in deren kleinster Umgebung unendlich viele singuläre Stellen liegen, kann nicht dem Stetigkeitsbereiche der Function angehören, weil man nämlich

keine Potenzreihe $\mathfrak{P}'(x|c')$ angeben kann, die keine singulären Stellen in ihrem Convergencebereiche enthält. —

Wenn die singulären Stellen aller aus einem ersten hervorgehenden Elemente ein Continuum begrenzen, auferhalb dessen noch Stellen x_0 existiren, so müssen wir sagen, dort ist die Function nicht definirt, denn man kann kein Element nach x_0 fortsetzen. Die Grenzstellen des Stetigkeitsbereiches einer Function werden wir aber später zu dem „Bereiche der Function“ zählen, wenngleich man auch nach diesen Stellen kein Element fortsetzen kann.

Es sei $f(x)$ eine eindeutige Function. Läßt sich dieselbe in der Umgebung einer Stelle a in Form einer daselbst convergenten Potenzreihe $\mathfrak{P}(x|a)$ darstellen, gehen somit die Werthe von $f(x)$ in dem genannten Bereiche aus der Gleichung

$$\sum_{r=0}^{\infty} a_r (x - a)^r = f(x)$$

hervor, so heißt die Function in der Umgebung der Stelle a *regulär* oder *von regulärem Verhalten*.

Die Gesamtheit der Stellen, an denen sich eine eindeutige analytische Function regulär verhält, bildet den Stetigkeitsbereich derselben. Innerhalb dieses Bereiches ist $f(x)$ eine endliche, stetig veränderliche Gröfse, die an jeder Stelle x_0 einen bestimmten Werth annimmt, der auch offenbar als Grenzwert derjenigen Werthe anzusehen ist, welche sich ergeben, wenn man für eine nach x convergirende Reihe von Variablenwerthen die zugehörigen Functionalwerthe sucht. Befindet sich die Stelle x_0 auf dem Convergencekreise eines Elementes $\mathfrak{P}_1(x|b)$ der Function, ohne auf der Begrenzung des Stetigkeitsbereiches derselben zu liegen, und bezeichnet

$$x_0^{(1)}, x_0^{(2)}, \dots x_0^{(m)} \dots$$

eine dem Convergencebereiche von $\mathfrak{P}_1(x|b)$ angehörige Punktmenge mit der Grenzstelle x_0 , so werden die Werthe

$$\mathfrak{P}_1(x_0^{(1)}|b), \mathfrak{P}_1(x_0^{(2)}|b), \dots \mathfrak{P}_1(x_0^{(m)}|b) \dots$$

nach dem bestimmten Functionalwerthe $f(x_0)$ convergiren, denn es gibt eine Reihe $\mathfrak{P}_2(x|x_0)$, die an denjenigen Stellen ihres Convergencebereiches, welche auch dem Convergencebereiche der Reihe $\mathfrak{P}_1(x|b)$ angehören, dieselben Werthe besitzt wie $\mathfrak{P}_1(x|b)$, und der Functionalwerth an der Stelle x_0 ist gleich

$$[\mathfrak{P}_2(x|x_0)]_{x=x_0}$$

oder gleich dem Grenzwerte der Reihe

$$\mathfrak{P}_2(x_0^{(n)}|x_0), \mathfrak{P}_2(x_0^{(n+1)}|x_0) \dots,$$

wo nun $x_0^{(n+\nu)}$ ($\nu = 0, 1, 2, \dots$) nur mehr Stellen sind, welche auch in dem Convergencebereiche von $\mathfrak{P}_2(x|x_0)$ liegen.

Der so definirte Werth braucht nicht direct durch die Substitution $x = x_0$ aus der Reihe $\mathfrak{P}_1(x|b)$ hervorzugehen, da eine Potenzreihe nur in ihrem Convergencebereiche stetig sein muß.

Aus diesen Betrachtungen geht hervor, daß eine eindeutige analytische Function an einer singulären Stelle c , wo eine der in dem Stetigkeitsbereiche bestehenden Eigenschaften der Endlich-, Stetig- und Eindeutigkeit verloren gehen muß, nicht einen von demjenigen endlichen Grenzwerte verschiedenen endlichen Werth besitzen kann, nach welchem die aus einem Elemente mit der singulären Stelle c entspringenden Functionalwerthe convergiren, sofern die Variablenwerthe aus dem Innern des Convergencebereiches des genannten Elementes nach c convergiren, d. h. *die analytische Function kann keine endlichen Discontinuitäten an ihren singulären Stellen erleiden.*

In der That: sei $f(x)$ eine analytische Function mit solch einer singulären Stelle c , so wird $(x - c) \cdot f(x)$ in der Umgebung von c regulären Verhaltens sein und die das Product darstellende Potenzreihe hat die Gestalt

$$(x - c) \mathfrak{P}(x - c) = \sum_{r=1}^{\infty} c_r (x - c)^r,$$

weil das Product für $x = c$ verschwindet; dann aber ist $f(x)$ in der Umgebung von c regulär und die Voraussetzung ist nicht zulässig.

Die Function kann an einer singulären Stelle c auch nicht dadurch vieldeutig sein, daß sie daselbst bei einer endlichen oder unendlichen Anzahl verschiedener Annäherungen mit den Variablenwerthen verschiedene aber endliche Werthe annimmt, denn es gäbe immer noch Potenzreihen $\mathfrak{P}(x|c)$, die mit gewissen, aus dem primitiven Elemente abgeleiteten Reihen, deren Convergencekreise die singuläre Stelle c besitzen, an unendlich vielen Stellen mit der Häufungsstelle c übereinstimmen, und übrigens wäre auch $(x - c) f(x)$ und dann $f(x)$ regulär. Also auch dieses Verhalten ist zufolge der Definition der singulären Stelle nicht möglich.

Die eindeutige analytische Function wird demnach an den singulären Stellen jedenfalls unendlich und gleichzeitig vielleicht auch vieldeutig. Diese Möglichkeit kann man hier nicht ausschließen, denn die letzten Argumentationen verlieren nun ihre Berechtigung. *Eine eindeutige analytische Function, die aber überhaupt nicht unendlich wird, gibt es nicht*, oder — was dasselbe sagt — eine solche Function kann nur eine Constante sein.

Um die Art des Unendlichwerdens zu fixiren, suchen wir zunächst die nothwendige und hinreichende Bedingung dafür, daß eine eindeutige analytische Function $f(x)$ an einer Stelle x_0 endlich und stetig bleibt.

Wenn x_0 eine Stelle des Stetigkeitsbereiches der Function $f(x)$ ist, so convergirt das Product $(x-x_0)f(x)$ nach Null, auf welchem Wege immer die Variable nach x_0 rückt. Dasselbe gilt von dem Producte der Function $f(x)$ und einer in der Umgebung von x_0 regulären und für $x = x_0$ verschwindenden Function. Ist aber umgekehrt

$$[(x-x_0)f(x)]_{x=x_0} = 0,$$

so wird $f(x)$ in der Umgebung von x_0 durch eine Potenzreihe dargestellt.

In der That: nehmen wir zuerst an, daß das Product $(x-x_0)f(x)$ bei irgend einer Annäherung von x an die Stelle x_0 nach dem endlichen Werthe a convergirt, so ist die analytische Function $(x-x_0)f(x)$ in der Umgebung von x_0 regulären Verhaltens und es existirt eine Darstellung:

$$(x-x_0)f(x) = a_0 + (x-x_0) \mathfrak{P}_1(x|x_0) = \sum_{\nu=0}^{\infty} a_{\nu}(x-x_0)^{\nu}.$$

Hieraus folgt, daß

$$f(x) = \frac{a}{x-x_0} + a_1 + a_2(x-x_0) + a_3(x-x_0)^2 + \dots$$

ist und $f(x)$ wird an der Stelle x_0 unendlich groß, solange a_0 von Null verschieden ist. Ist aber

$$[(x-x_0)f(x)]_{x=x_0} = 0,$$

so muß a_0 verschwinden, und $f(x)$ ist in der Umgebung von x_0 endlich und stetig. Die verlangte Bedingung ist somit gefunden.

Trifft man nun die Unterscheidung: Entweder gibt es eine ganzzahlige Potenz von $(x-c)$ derart, daß das Product von $f(x)$ und dieser Potenz eine in der Umgebung der singulären Stelle c reguläre Function ist, oder es gibt keine solche Potenz, und nennt man in dem ersten Falle die singuläre Stelle eine *aufserwesentlich*, in dem zweiten Falle eine *wesentlich singuläre*, so erhellt, daß die analytische Function in der Umgebung einer aufserwesentlich singulären Stelle in der bestimmten Gestalt

$$f(x) = \frac{1}{(x-c)^m} [a_0 + a_1(x-c) + a_2(x-c)^2 + \dots] = \sum_{\mu=-m}^{\infty} a_{\mu}(x-c)^{\mu}$$

darstellbar ist, wo m eine positive ganze Zahl gleich oder größer als Eins bedeutet und a_0 von Null verschieden ist. Ferner wird $f(x)$ für jeden unendlich kleinen Werth von $|x-c|$ unendlich groß und es gilt $f(x) = \infty$.*)

*) S. Weierstraß: Zur Theorie der eindeutigen analytischen Functionen (in den Abhandl. der Berliner Akad. 1876 oder in den Abhandlungen aus der Functionenlehre S. 2).

Der Functionswerth ist somit auch an der außerordentlich singulären Stelle als Grenze derjenigen Werthe anzusehen, welche die Function an den in beliebig kleiner aber endlicher Umgebung von c liegenden Stellen ihres Stetigkeitsbereiches annimmt. In diesem Umstande liegt der Grund, warum man auch die singulären oder Grenzstellen des Stetigkeitsbereiches zu dem Bereiche der Function rechnet.

In dem Convergencebereiche der Reihe $\sum_{\mu=-m}^{\infty} a_{\mu}(x-c)^{\mu}$ gibt es nur eine singuläre Stelle der Function $f(x)$, nämlich c . Daraus folgt unmittelbar, daß die Häufungsstelle unendlich vieler außerwesentlich singulärer Stellen eine wesentlich singuläre Stelle sein muß, denn für diese gibt es keine Umgebung, die nicht auch singuläre Stellen enthielte. Umgekehrt braucht natürlich die wesentlich singuläre Stelle nicht Häufungsstelle außerwesentlich singulärer zu sein.

Da wir unter $x = \infty$ stets die GröÙe $\frac{1}{x}$ verstehen und demnach die an der Stelle ∞ reguläre Function in der Umgebung der unendlich fernen Stelle die Darstellung hat

$$a_1 + a_1 \frac{1}{x} + a_2 \frac{1}{x^2} + \dots,$$

so wird die Stelle ∞ eine außerwesentlich singuläre sein, wenn die Function daselbst erst nach Multiplication einer ganzzahligen Potenz von $\frac{1}{x}$ regulären Verhaltens ist. Die Function erhält dann die Darstellung

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} a_{\mu} x^{m-\mu} \quad (a_0 \geq 0).$$

Die außerwesentlich singulären Stellen c und ∞ sind nunmehr durch die Bedingungen gekennzeichnet, daß die GröÙen

$$\left((x-c)^m f(x) \right)_{x=c}, \quad \left(\frac{1}{x^m} f(x) \right)_{x=\infty}$$

endlich und von Null verschieden sind. Nach dem Exponenten m heißt die außerwesentlich singuläre Stelle eine von der m^{ten} Ordnung oder eine m -fache.

Die wesentlich singulären Stellen (c) einer Function $f(x)$ sind für die reciproke Function $\frac{1}{f(x)}$ gewiß Stellen gleicher Art. Denn wäre $\frac{1}{f(x)}$ in der Umgebung von c regulär oder hätte $\frac{1}{f(x)}$ die außerwesentlich singuläre Stelle m^{ter} Ordnung, so müßte $f(x)$ ebenfalls regulär sein und zwar besäÙe $f(x)$ in dem zweiten Falle die m -fache Nullstelle c , denn das die Function $f(x)$ in der Umgebung von c darstellende Element hätte die Gestalt $(x-c)^m \mathfrak{P}(x-c)$.

Die Stelle c ist aber auch eine wesentlich singuläre Stelle von $f(x) - A$ und $\frac{1}{f(x) - A}$, wo A irgend eine angebbare Gröfse bezeichnet.

Daraus folgt, dafs die Function $f(x)$ in unendlich kleiner Umgebung einer wesentlich singulären Stelle jedem Werthe beliebig nahe kommen kann. Denn wenn die Functionalwerthe bei einer bestimmten Annäherung von x an die Stelle c der Begrenzung des Stetigkeitsbereiches nach dem Werthe ∞ convergiren, und auch die Functionen $\frac{1}{f(x)}$ und $\frac{1}{f(x) - A}$ in beliebiger Nähe von c dem absoluten Betrage nach gröfser werden als jede angebbare Gröfse G , so gibt es daselbst auch Stellen, wo $|f(x)|$ gröfser wird als G , und Stellen, wo $|f(x)|$ von jeder Gröfse A um die beliebig kleine Gröfse $\frac{1}{G}$ beliebig wenig verschieden ist.

Die Function ist demnach an der wesentlich singulären Stelle völlig unbestimmt. —

Es sollen die bisher aufgestellten, durch bestimmte arithmetische Gröfsenoperationen definirten Ausdrücke betrachtet werden, auf dafs wir die neuen Resultate gleich verwerten können.

Die rationale Function einer Veränderlichen konnte stets auf die Form

$$f(x) = g(x) + \sum_{v=1}^n \left\{ \frac{A_1^{(v)}}{x - c_v} + \frac{A_2^{(v)}}{(x - c_v)^2} + \cdots + \frac{A_m^{(v)}}{(x - c_v)^m} \right\}$$

gebracht werden, wo $g(x)$ eine ganze rationale Function bedeutet, deren Grad etwa m sei. Die Function $f(x)$ ist eine eindeutige, stetig veränderliche Gröfse, aber auch eine monogene analytische Function, denn sie läfst sich in die Umgebung jeder von c_1, c_2, \dots, c_n und ∞ verschiedenen Stelle x_0 durch eine Potenzreihe $\mathfrak{P}(x|x_0)$ darstellen, indem

$$g(x) = g(x_0) + g'(x_0) \frac{x - x_0}{1!} + \cdots + g^{(m)}(x_0) \frac{(x - x_0)^m}{m!}$$

ist und der Ausdruck

$$\frac{1}{(x - c_v)^{\mu_v}} = \frac{1}{(x_0 - c_v + (x - x_0))^{\mu_v}} = \frac{1}{(x_0 - c_v)^{\mu_v}} \frac{1}{\left(1 - \frac{x - x_0}{c_v - x_0}\right)^{\mu_v}}$$

in eine innerhalb des durch die Ungleichung

$$\left| \frac{x - x_0}{c_v - x_0} \right| < 1$$

definirten Bereiches convergente Potenzreihe zu entwickeln und die Summe einer endlichen Anzahl solcher Reihen nach Potenzen von $(x - x_0)$ gewifs endlich ist.

Die Stellen c_1, c_2, \dots, c_n und ∞ sind die Grenzstellen des Stetigkeitsbereiches unserer Function $f(x)$, und weil

$$(x - c_v)^{m_v} f(x) \quad \text{und} \quad \frac{1}{x^m} f(x)$$

in der Umgebung von c_v und ∞ regulären Verhaltens und an diesen Stellen von Null verschieden sind, sind die Grenzstellen ausserwesentlich singuläre der m_v ten und m ten Ordnung.

Die rationale Function hat somit keine wesentlich singuläre Stellen. Diese Eigenschaft ist charakteristisch, denn umgekehrt ist jede eindeutige analytische Function $f(x)$, deren Stetigkeitsbereich nur durch ausserwesentlich singuläre Stellen begrenzt ist, eine rationale Function.)*

Der Voraussetzung zufolge ist die durch die singulären Stellen definirte Punktmenge eine isolirte, welche keine abgeleitete Punktmenge besitzt, denn deren Stellen wären ja wesentlich singuläre Stellen. Daher ist $f(x)$ in der Umgebung jeder Stelle x_0 in der Form

$$(x - x_0)^{-m} [c_0 + c_1 (x - x_0) + c_2 (x - x_0)^2 + \dots]$$

darzustellen, wo m nur für eine endliche Anzahl von Stellen x_0 positiv ist.

Gibt es im Endlichen keine Grenzstelle, läßt sich $f(x)$ demnach in der Umgebung jeder endlichen Stelle x_0 und auch in der Umgebung von $x = 0$ durch eine für alle endlichen Werthe von $|x - x_0|$ resp. $|x|$ convergente und ausschliesslich nach positiven Potenzen fortschreitende Reihe darstellen, so ist $f(x)$ nothwendig eine ganze rationale Function

$$f(x) = c_0 + c_1 (x - x_0) + \dots + c_m (x - x_0)^m$$

oder

$$f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m,$$

denn die beständig convergenten Reihen

$$c_0 + c_1 (x - x_0) + c_2 (x - x_0)^2 + \dots$$

oder

$$a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots$$

müssen bei einem endlichen Gliede abbrechen, wenn eine ganze Zahl m existiren soll, so daß

$$\left(\frac{1}{x}\right)^m f(x)$$

in der Umgebung der unendlich fernen Stelle ∞ regulär und für unendlich große Werthe von x endlich und von Null verschieden wird.

Existiren hingegen im Endlichen die n singulären Stellen c_1, c_2, \dots, c_n und wird

$$(x - c_v)^{m_v} f(x) \quad (v = 1, 2, \dots, n)$$

in der Umgebung von c_v regulär und an der Stelle c_v endlich und von Null verschieden, so ist das Product

*) Weierstrass, Abhandl. aus der Functionenlehre S. 3.

$$f(x) \prod_{v=1}^n (x - c_v)^{m_v}$$

in der Umgebung jeder endlichen Stelle in eine Potenzreihe zu entwickeln und somit eine ganze rationale Function $g(x)$, denn das Product von $f(x)$ und der ganzen rationalen Function $\prod_{v=1}^n (x - c_v)^{m_v}$ besitzt ebensowenig wie $f(x)$ die wesentlich singuläre Stelle ∞ . Auf solche Weise ist die Darstellung von $f(x)$ als Quotient ganzer rationaler Function

$$f(x) = \frac{g(x)}{\prod_{v=1}^n (x - c_v)^{m_v}}$$

wirklich bewerkstelligt und der Satz bewiesen.

Fügt man darnach dem Stetigkeitsbereiche (A) einer Function $f(x)$ die außerwesentlich singulären Stellen hinzu und stimmt der neue Bereich (A') mit dem unbegrenzten Bereiche der unbeschränkten Variablen x überein, so ist $f(x)$ eine rationale Function. Ist aber der neue Bereich (A') begrenzt, so hat $f(x)$ nothwendig wesentlich singuläre Stellen. Die Function heißt dann *transcendent* und man sagt von ihr, daß sie sich in dem Bereiche (A') wie eine rationale Function verhält. —

Entwickelt man den Quotienten gegebener rationaler Functionen

$$\begin{aligned} g_1(x) &= \alpha_n x^n + \alpha_{n-1} x^{n-1} + \dots + \alpha_0 \\ g_2(x) &= \beta_m x^m + \beta_{m-1} x^{m-1} + \dots + \beta_0 \end{aligned}$$

in eine Potenzreihe

$$f(x) = \frac{g_1(x)}{g_2(x)} = \sum_{v=0}^{\infty} a_v x^v = \mathfrak{P}(x),$$

so sind die Coefficienten aller auf das $(n+1)^{\text{te}}$ folgenden Glieder durch eine Gleichung der Form

$$\beta_0 a_{n+v} + \beta_1 a_{n+v-1} + \dots + \beta_m a_{n+v-m} = 0$$

definiert, d. h. jeder Coefficient a_{n+v} ist als ein und dieselbe ganze Function ersten Grades einer constanten Anzahl m unmittelbar voranstehender Coefficienten darzustellen.

Eine Potenzreihe, deren Coefficienten von einem bestimmten ab diese Eigenschaft haben, heißt *recurrend*.

Eine recurrende Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x) = \sum_{v=0}^{\infty} c_v x^v$$

oder $\mathfrak{P}(x|x_0)$ stellt in ihrem Convergenzbereiche eine rationale Function dar.

Setzen wir unter Annahme einer für jedes ν geltenden Beziehung:

$$\beta_0 c_{n+\nu} + \beta_1 c_{n+\nu-1} + \cdots + c_{n+\nu-m} \beta_m = 0$$

$$\beta_m x^m + \beta_{m-1} x^{m-1} + \cdots + \beta_0 = g_2(x)$$

und bilden das Product $\mathfrak{P}(x) \cdot g_2(x)$, so ist die convergente Summe

$$\sum_{\mu=0}^m (\beta_\mu x^\mu \mathfrak{P}(x))$$

wegen der angesetzten Gleichung nur eine Potenzreihe mit einer endlichen Anzahl von Gliedern, d. h. eine ganze rationale Function $g_1(x)$ und aus

$$\mathfrak{P}(x) \cdot g_2(x) = g_1(x)$$

folgt

$$\mathfrak{P}(x) = \frac{g_1(x)}{g_2(x)}.$$

Die Potenzreihe ist also nur das Element der durch sie definirten rationalen Function. —

Von der Summe unendlich vieler rationaler Functionen

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} f_\nu(x) = F(x)$$

können wir nun auch sagen, sie ist eine eindeutige analytische Function, wenn für dieselbe ein Bereich gleichmäßiger Convergenz existirt. In der Umgebung einer Stelle x_0 dieses Bereiches kann man nämlich jede einzelne der rationalen Functionen $f_\nu(x)$ in eine Potenzreihe $\mathfrak{P}_\nu(x|x_0)$ entwickeln und hierauf die Summe

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \mathfrak{P}_\nu(x - x_0)$$

selbst in eine Potenzreihe $\mathfrak{P}(x - x_0)$ zusammenziehen. Diese Reihe bildet ein primitives Element der nunmehr schon als analytische Function erkannten GröÙe $F(x)$, aus dem man alle Elemente ableiten kann.

Der Bereich der gleichmäßigen Convergenz einer Reihe $\sum_{\nu=1}^{\infty} f_\nu(x)$

kann aus mehreren von einander getrennten einfach zusammenhängenden und zweifach ausgedehnten Continuis bestehen. Da die Stellen auf den Begrenzungen eines Bereiches (A), der die Stellen x_0 enthält, nothwendig singuläre Stellen des primitiven Elementes $\mathfrak{P}(x|x_0)$ und seiner Fortsetzungen sein werden, so können die Convergenzbereiche der Elemente oder kann der Stetigkeitsbereich der durch $\mathfrak{P}(x|x_0)$ definirten Function nicht über das Continuum hinausragen.

In einem zweiten Continuum definirt die Reihe $\sum_{\nu=1}^{\infty} f_\nu(x)$ eine zweite Function, die mit der früheren — soweit wir jetzt ersehen —

aufser allem Zusammenhange steht, denn wir sind nicht im Stande, die Elemente der beiden Functionen in einander überzuführen.

Gibt es endlich auch Stellen aufserhalb aller Bereiche gleichmässiger Convergenz, so definirt die gegebene Summe dort keine analytische Function. —

Wir begegneten früher auch einer beständig convergenten Reihe

$$\mathfrak{P}(x) = 1 + \frac{x}{1} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

Diese definirt eine eindeutige analytische Function $f(x)$ und stellt sie vollständig dar; die Function $f(x)$ hat die wesentlich singuläre Stelle ∞ und ihr Werth an einer endlichen Stelle x_1 wird durch $\mathfrak{P}(x_1)$ oder den Werth einer direct abzuleitenden Reihe $\mathfrak{P}(x|x_0)$ an der Stelle x_1 anzugeben sein. Da offenbar jede Ableitung von $\mathfrak{P}(x)$ wieder $\mathfrak{P}(x)$ ist, wird

$$\mathfrak{P}(x - x_0) = \mathfrak{P}(x_0) \cdot \left(1 + \frac{x - x_0}{1} + \frac{(x - x_0)^2}{2!} + \dots\right)$$

und nun

$$\mathfrak{P}(x_1 - x_0) = f(x_0) \cdot f(x_1 - x_0) = f(x_1).$$

Die Function $f(x) = 1 + \frac{x}{1} + \frac{x^2}{2!} + \dots$ hat also die in der Gleichung $f(x) = f(x_0) \cdot f(x - x_0)$ ausgesprochene Eigenschaft, die vor Allem besagt, daß $f(x)$ in seinem Stetigkeitsbereiche nicht verschwinden kann, indem mit einer Nullstelle x_0 auch x eine sein müßte und eine Function, die an jeder Stelle x verschwindet, keinen Sinn hat. Wir bezeichnen sie mit $E(x)$ und schreiben ihre Eigenschaft in der Form $E(x_1)E(x_2) = E(x_1 + x_2)$, indem wir an Stelle von x und x_0 x_1 resp. x_2 setzen.

Offenbar wird jede beständig convergente Reihe eine eindeutige analytische Function mit der wesentlich singulären Stelle ∞ darstellen, und umgekehrt wird eine für jeden endlichen Werth der Variablen reguläre eindeutige analytische Function durch eine beständig convergente Reihe auszudrücken sein.

Diese eindeutigen Functionen heißen *ganze Functionen* und zwar *ganze rationale* oder *ganze transcendente*, je nachdem die Stelle ∞ eine aufserwesentlich oder wesentlich singuläre Stelle ist. —

Für die ganze rationale Function $g(x)$ bestand der Satz: Es läßt sich stets eine positive Gröfse r der Beschaffenheit angeben, daß für alle der Bedingung $|x| > r$ genügenden Werthe der Variablen der absolute Betrag von $g(x)$ gröfser wird als eine beliebig vorgegebene Gröfse A . Für die ganze transcendente Function

$$G(x) = \sum_{r=0}^{\infty} a_r x^r$$

kann der gleiche Satz nicht ausgesprochen werden, denn der Beweis des voranstehenden Satzes beruhte auf der Voraussetzung, daß die

Potenzexponenten eine angebbare Zahl nicht überschreiten. Doch wir können zeigen, daß unter den Werthen x , deren Betrag größer ist als eine positive GröÙe r , stets solche existiren, für die der Betrag von $G(x)$ größer wird als eine beliebige GröÙe A .*)

In der That: bezeichnet K die obere Grenze der Werthe $|G(x)|$ für alle Werthe x mit dem Betrage ξ , so ist für jedes ν

$$K \geq |a_\nu| \xi^\nu$$

und hier kann man $\xi > r$ so wählen, daß die obere Grenze K auch größer wird als A ; es muß unter den GröÙen $|a_\nu|$ nur solche geben, die von Null verschieden sind, und das ist zweifellos der Fall, wenn die ganze Function nicht überall Null oder constant ist.

Dieser Satz schließt nicht aus, daß die ganze transcendente Function in dem Bereiche $|x| > r$ Werthe annimmt, die kleiner sind als jede vorgegebene GröÙe, und das ist auch der Fall, denn in beliebig kleiner Umgebung der Stelle ∞ existiren Stellen, an denen die ganze Function jedem Werthe beliebig nahe kommt.

Wir betrachten endlich noch die Verallgemeinerung des Quotienten ganzer rationaler Functionen, nämlich den *Quotienten beständig convergenter Potenzreihen*

$$G_1(x) = \sum_{\nu=0}^{\infty} a_\nu x^\nu, \quad G_2(x) = \sum_{\nu=0}^{\infty} b_\nu x^\nu,$$

der sich gewiß in der Umgebung der Stelle Null in eine Potenzreihe entwickeln läßt, wenn $G_2(0)$ nicht verschwindet. Diese Reihe definiert wieder eine eindeutige analytische Function, und zwar wird die Fortsetzung der Reihe

$$\frac{\sum_{\nu=0}^{\infty} a_\nu x^\nu}{\sum_{\nu=0}^{\infty} b_\nu x^\nu} = \sum_{\nu=0}^{\infty} c_\nu x^\nu = \mathfrak{P}(x)$$

um eine Stelle x_0 mit derjenigen Reihe übereinstimmen, in welche der Quotient der aus $G_1(x)$ und $G_2(x)$ direct abgeleiteten Reihen

$$\sum_{\nu=0}^{\infty} a'_\nu (x - x_0)^\nu \quad \text{und} \quad \sum_{\nu=0}^{\infty} b'_\nu (x - x_0)^\nu$$

zu entwickeln ist.

Haben $G_1(x)$ und $G_2(x)$ in der Umgebung einer Stelle c die Gestalt

$$\alpha_m(x - c)^m + \alpha_{m+1}(x - c)^{m+1} + \dots$$

$$\beta_n(x - c)^n + \beta_{n+1}(x - c)^{n+1} + \dots$$

*) J. Thomae, Elementare Theorie der analytischen Functionen §§ 109, 164, 165.

wo die ganzen Zahlen m und n auch Null sein können, so wird der Quotient

$$\frac{G_1(x)}{G_2(x)} = (x - c)^{m-n} \frac{\alpha_m + \alpha_{m+1}(x - c) + \dots}{\beta_m + \beta_{n+1}(x - c) + \dots}$$

in der Umgebung von c nach Null oder $\frac{\alpha_m}{\beta_m}$ oder unendlich convergiren, je nachdem $m - n$ positiv, Null oder negativ ist. Nur in der Umgebung der Unendlichkeitsstellen c des Quotienten kann man keine Potenzreihe $\mathfrak{P}(x|c)$ herstellen, welche mit dem Quotienten übereinstimmt, daher reicht der Convergencebereich des ursprünglichen Elementes $\mathfrak{P}(x)$ bis an die der Stelle Null nächstliegende Unendlichkeitsstelle des Quotienten, d. h. bis an die nächste n -fache Nullstelle des Nenners $G_2(x)$, welche für den Zähler $G_1(x)$ Nullstelle niedrigerer Ordnung ist.

Hier heisst eine Nullstelle c wieder n -fach, wenn die Entwicklung der ganzen Function $G(x)$ in der Umgebung von c mit dem Gliede n^{ter} Potenz beginnt oder wenn die Ableitungen der ersten $n - 1$ Ordnungen für $x = c$ verschwinden.

Hat die ganze Function $G_2(x)$ im Endlichen keine Nullstelle, so muß der Quotient $\frac{G_1}{G_2}$ wieder in eine beständig convergente Reihe zu entwickeln sein oder eine ganze Function definiren.

An diesen Satz schließt sich unmittelbar das Fundamentaltheorem der ganzen rationalen Function:

Jede ganze rationale Function $G(x)$ hat Nullstellen,

denn andernfalls müßte ja $\frac{1}{g(x)}$, wo $g(0)$ natürlich von Null verschieden vorausgesetzt wird, eine ganze Function sein, doch das ist nicht möglich, weil man eine GröÙe r so angeben kann, daß $|g(x)|$ für alle Werthe von x außerhalb der Umgebung r von $x = 0$ größer wird als eine vorgegebene GröÙe und dann keine Werthe in dem genannten Bereiche existiren, für welche auch $\left| \frac{1}{g(x)} \right|$ größer wird als eine angegebene GröÙe.

Dieser Beweis rührt von Weierstraß her.

§ 35. Endlich vieldeutige analytische Functionen.

Wir wollen auch die aus einer gegebenen Potenzreihe entspringende mehrdeutige analytische Function im Allgemeinen untersuchen.

Es sei also eine convergente Potenzreihe $\mathfrak{P}(x|a)$ gegeben und es sei bekannt, daß bei den unendlich vielen Übergängen von a nach einer Stelle x_0 eine endliche Anzahl von einander verschiedener Elemente

$$\mathfrak{P}_1(x|x_0), \quad \mathfrak{P}_2(x|x_0), \quad \dots \quad \mathfrak{P}_n(x|x_0)$$

hervorgehen. Jedes dieser Elemente \mathfrak{P} , besitzt mindestens eine sin-

$$\overline{\mathfrak{P}}_1(x|x_0) = \mathfrak{p}_1(x|x_0) + \mathfrak{P}_n(x|x_0)$$

$$\overline{\mathfrak{P}}_{\nu'}(x|x_0) = \mathfrak{p}_{\nu'}(x|x_0) + \mathfrak{p}_{\nu'-1}(x|x_0) \cdot \mathfrak{P}_n(x|x_0) \quad (\nu' = 2, 3 \dots n-1)$$

$$\overline{\mathfrak{P}}_n(x|x_0) = \mathfrak{p}_{n-1}(x|x_0) \cdot \mathfrak{P}_n(x|x_0)$$

darzustellen, aber man kann aus diesen Reihen nicht n Potenzreihen nach $(x-c)$ bilden, weil $\mathfrak{P}_n(x|x_0)$ unendlich wird, wenn x nach c convergirt. Dann muß $\mathfrak{P}_n(x|x_0)$ und $f_n(x)$ die singuläre Stelle c besitzen, außer wenn $\mathfrak{p}_{n-1}(c|x_0)$ verschwindet. In diesem Falle muß $\mathfrak{P}_{n-1}(x|x_0)$ und $f_{n-1}(x)$ die singuläre Stelle c haben, wenn nur $[\mathfrak{p}(x|x_0)]_{x=c}$ von Null ver-

schieden ist. Ist aber $\mathfrak{p}(c|x)$ gleich Null und verschwinden alle Potenzreihen an der Stelle $x=c$, so muß nothwendig der letzte Coefficient $f_1(x)$ die singuläre Stelle c besitzen. Einer der Coefficienten $f_\mu(x)$ wird also in der That an der Stelle c unendlich.

Denken wir nun eine n -deutige analytische Function y direct durch eine algebraische Gleichung definirt, deren Coefficienten eindeutige analytische Functionen sind, und will man diejenigen Stellen finden, an denen mindestens ein Zweig der Function unendlich wird, so suche man die Grenzstellen des gemeinsamen Stetigkeitsbereiches dieser eindeutigen Functionen. Sind die Coefficienten ganze Functionen, so wird die Stelle ∞ die einzige Unendlichkeitsstelle.

Die vorstehenden Beweise sind nicht mehr anwendbar, wenn es sich um unendlich vieldeutige monogene analytische Functionen handelt, denn die Summe unendlich vieler Elemente $\mathfrak{P}_\mu(x|x_0)$ oder irgend eine der früher benützten Combinationen, die nun bis auf die letzte immer aus unendlich vielen Summanden bestehen, braucht keinen Bereich gleichmäßiger Convergenz zu besitzen, und wir können die Reihen $\overline{\mathfrak{P}}_\mu(x|x_0)$ nicht mehr bilden. Wir dürfen nicht schließen, daß die unendlich vieldeutige analytische Function auch unendlich werden müsse, und es erscheint möglich, daß unendlich vieldeutige Functionen existiren, die nirgends unendlich werden; doch der Stetigkeitsbereich oder der Bereich regulärer Stellen einer solchen Function muß auch begrenzt sein. —

Es ist jetzt noch zu erwägen, was man aus dem einzigen Umstande schließen kann, daß einem Elemente $\mathfrak{P}(x|x_0)$ mehrere Potenzreihen $\mathfrak{P}_\nu(x|x_1)$ ($\nu = 1, 2 \dots$) entspringen. Der Einfachheit halber nehmen wir an, daß wir es mit einer zweideutigen monogenen analytischen Function zu thun haben.

Ist das Element $\mathfrak{P}_1(x|x_1)$ durch Vermittlung der Stellen $a_1, a_2, \dots a_n$ und der Reihen

$$\mathfrak{P}_1(x|x_0, a_1), \quad \mathfrak{P}_1(x|x_0, a_1, a_2), \dots \mathfrak{P}_1(x|x_0, a_1, a_2, \dots a_n)$$

aus $\mathfrak{P}_1(x|x_0)$ abgeleitet, so kann man auch noch unendlich viele andere

continuirliche Wege finden, auf denen man wiederum von $\mathfrak{P}_1(x|x_0)$ auf $\mathfrak{P}_1(x|x_1)$ geführt wird.

Heißt der gemeinsame Convergencebereich der aufeinanderfolgenden Elemente

$$\mathfrak{P}_1(x|x_0, a_1, a_2, \dots a_{v-1}) \text{ und } \mathfrak{P}_1(x|x_0, a_1, a_2, \dots a_v)$$

A_v , und wählt man in demselben ein oder mehrere a_v hinlänglich benachbarte Stellen a'_v , so werden offenbar auch die Elemente

$$\mathfrak{P}_1(x|x_0, a'_1), \mathfrak{P}_1(x|x_0, a'_1, a'_2) \dots \mathfrak{P}_n(x|x_0, a'_1, a'_2, \dots a'_n)$$

den Übergang zu der Reihe $\mathfrak{P}_1(x|x_0)$ vermitteln, denn deren Convergencebereiche können ganz in denen der früheren Reihen enthalten sein.

Läßt man darauf x eine von x_0 über $a_1, a_2, \dots a_n$ nach x_1 und über $a'_n, a'_{n-1}, \dots a'_1, a'_0$ nach x_0 zurückführende Werthemenge P durchlaufen, welche ein zweifach ausgedehntes Continuum vollständig begrenzt, verläßt man aber niemals das aus den Convergencebereichen aller aufgeschriebenen Elemente zusammengesetzte Gebiet, so wird der diesen Variablenwerthen entsprechende Functionalwerth von

$$[\mathfrak{P}_1(x|x_0)]_{x=x_0} \text{ ausgehend über } [\mathfrak{P}_1(x|x_1)]_{x=x_1}$$

nach dem Anfangswerthe zurückkehren. Es gibt also *geschlossene Wege*, auf welchen ein Functionalwerth in sich selbst übergeführt wird; dieselben begrenzen ein Continuum, an dessen inneren und Begrenzungsstellen der zu $\mathfrak{P}_1(x|x_0)$ gehörige Zweig regulären Verhaltens ist.

Vermitteln ferner die Stellen $b_1, b_2, \dots b_m$ einen Übergang von $\mathfrak{P}_1(x|x_0)$ nach einer zweiten Reihe $\mathfrak{P}_2(x|x_1)$, so muß der Functionalwerth $[\mathfrak{P}_2(x|x_1)]_{x=x_1}$ auf dem Wege von x_1 über die b und x_0 und die Stellen a bis x_1 in $[\mathfrak{P}_1(x|x_1)]_{x=x_1}$ übergehen und die Fortsetzungen

$$\mathfrak{P}_2(x|x_1, a_n), \mathfrak{P}_2(x|x_1, a_n, a_{n-1}) \dots \mathfrak{P}_2(x|x_1, a_n, a_{n-1}, \dots a_1)$$

führen nothwendig zu einer von $\mathfrak{P}_1(x|x_0)$ verschiedenen Reihe $\mathfrak{P}_2(x|x_0)$.

Es gibt also auch geschlossene Wege, auf welchen ein Functionalwerth $[\mathfrak{P}_1(x|x_0)]_{x=x_0}$ in einen andern $[\mathfrak{P}_2(x|x_0)]_{x=0}$ übergeht. Dieselben begrenzen ein Continuum, innerhalb dessen Stellen liegen müssen, in deren Umgebung keine aus $\mathfrak{P}_1(x|x_0)$ oder $\mathfrak{P}_2(x|x_0)$ ableitbare Potenzreihe existirt.

Andernfalls könnte man ja innerhalb dieses Continuums immer eine Folge von Stellen

$$c_1, c_2, \dots c_r \text{ oder } c'_1, c'_2, \dots c'_s$$

so angeben, daß die Convergencebereiche der Reihen

$$\mathfrak{P}_1(x|x_0, c_1), \mathfrak{P}_1(x|x_0, c_1, c_2) \dots \mathfrak{P}_1(x|x_0, c_1, c_2, \dots c_r)$$

theilweise mit denen der Elemente

$$\mathfrak{P}_1(x|x_0, a_1, \dots a_r), \quad \mathfrak{P}_1(x|x_0, b_1, \dots b_\mu)$$

zusammenfallen und daselbst mit ihnen übereinstimmen; und dasselbe Verhältniß bestünde zwischen den Reihen

$$\mathfrak{P}_2(x|x_0, c_1'), \quad \mathfrak{P}_2(x|x_0, c_1', c_2') \dots \mathfrak{P}_2(x|x_0, c_1', c_2', \dots c_s')$$

und den durch Vermittlung der Stellen a respective b aus $\mathfrak{P}_2(x|x_0)$ abgeleiteten Reihen. Sind aber die Stellen c_r und c_s' so nahe bei a_n und b_m gelegen, daß der Convergencebereich der Elemente

$$\mathfrak{P}_1(x|x_0, c_1, c_2, \dots c_r) \quad \text{und} \quad \mathfrak{P}_2(x|x_0, c_1', c_2', \dots c_s')$$

die letztgenannten Stellen umfaßt, so kann man aus diesen direct die Reihen

$$\mathfrak{P}_1(x|x_0, a_1, a_2, \dots a_n) \quad \text{und} \quad \mathfrak{P}_1(x|x_0, b_1, b_2, \dots b_m)$$

beziehungsweise

$$\mathfrak{P}_2(x|x_0, a_1, a_2, \dots a_n) \quad \text{und} \quad \mathfrak{P}_2(x|x_0, b_1, b_2, \dots b_m)$$

ableiten, und zwar stimmen dann diese Paare von Elementen in ihrem gemeinsamen Convergencebereiche überein, soweit er auch dem Bereiche von

$$\mathfrak{P}_1(x|x_0, c_1, c_2, \dots c_r) \quad \text{oder} \quad \mathfrak{P}_2(x|x_0, c_1', c_2', \dots c_s')$$

angehört. Wenn aber die Stellen a_n und b_m genügend nahe bei x_1 liegen, so enthält der in Rede stehende Bereich auch die Stelle x_1 und es werden die Reihen

$$\mathfrak{P}_1(x|x_0, a_1, a_2, \dots a_n, x_1) \equiv \mathfrak{P}_1(x|x_1)$$

$$\mathfrak{P}_1(x|x_0, b_1, b_2, \dots b_m, x_1) \equiv \mathfrak{P}_2(x|x_1)$$

$$\mathfrak{P}_2(x|x_0, a_1, a_2, \dots a_n, x_1) \equiv \mathfrak{P}_2(x|x_1)$$

$$\mathfrak{P}_2(x|x_0, b_1, b_2, \dots b_m, x_1) \equiv \mathfrak{P}_1(x|x_1)$$

untereinander übereinstimmen, was gegen die Voraussetzung verstößt.

Die ausgezeichnete Stelle (c) innerhalb des durch einen geschlossenen Weg begrenzten Bereiches, bei Durchlaufen dessen ein Element eines Zweiges in ein Element eines andern Zweiges übergeht, heißt eine *Verzweigungsstelle* der mehrdeutigen Function. Dieser Übergang ist nur dadurch erklärlich, daß jedes Paar der aus $\mathfrak{P}_1(x|x_0)$ und $\mathfrak{P}_2(x|x_0)$ oder $\mathfrak{P}_1(x|x_1)$ und $\mathfrak{P}_2(x|x_1)$ abgeleiteten simultanen Elemente

$$\mathfrak{P}_1(x|x'), \quad \mathfrak{P}_2(x|x')$$

mit der singulären Stelle (c) Functionalwerthe gibt, die bei irgend einer innerhalb des Convergencebereiches von $\mathfrak{P}_1(x|x')$ und $\mathfrak{P}_2(x|x')$ gelegenen Werthereihe der Variablen mit der Häufungsstelle c immer nach derselben Grenze convergiren, denn dann kann bei einem durch c gelegten Wege ein Functionalwerth von jener gemeinsamen Grenze ab zwei verschiedene Wege einschlagen. Diese Grenze aber kann endlich oder unendlich sein.

Es ist aber wohl zu beachten, daß aus der Aussage allein: Eine zweideutige Function hat an der Stelle c einen und nur einen Werth, noch nicht geschlossen werden kann, daß sie sich dort verzweigt, denn die Function kann in der Umgebung dieser Stelle durch zwei Potenzreihen darstellbar sein, die einfach in den Anfangsgliedern übereinstimmen. Die Verzweigungsstelle muß zudem eine solche sein, in deren Umgebung kein Zweig regulären Verhaltens ist. Es ist deshalb nicht jeder mehrfache Punkt (an welchem die Functionalwerthe übereinkommen) Verzweigungspunkt, aber jeder Verzweigungspunkt mehrfacher Punkt, und zwar wird die n deutige monogene analytische Function Verzweigungsstellen $1, 2, 3, \dots (n-1)^{\text{ter}}$ Ordnung aufweisen können, an denen 2, 3 usw., endlich alle n Zweige zusammenhängen, jedenfalls aber muß jeder Zweig mit jedem andern, sei es direct oder sei es indirect, verzweigt sein. —

Es sollte nun unsere Aufgabe sein, die voranstehenden Untersuchungen auf den Fall von Potenzreihen mehrerer Variabeln auszuweiten. Wenn wir wieder von einer Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a))$$

mit dem Convergenzradius R ausgehen, und durch die Gesamtheit der ineinander fortsetzbaren, dem gegebenen Elemente entspringenden Potenzreihen die monogene analytische ein- oder mehrdeutige Function definiren und den Stetigkeitsbereich der m deutigen Function durch die Gesamtheit der Stellen bestimmen, in deren Umgebung m reguläre Elemente existiren, haben wir zunächst das Verhalten der eindeutigen Function an den Grenzstellen zu untersuchen und als erste Aufgabe erscheint die Bestimmung der nothwendigen und hinreichenden Bedingung dafür, daß die analytische Function an einer Stelle $(x^{(0)})$ endlich und stetig bleibt.

Die nothwendige Bedingung besteht gewiß darin, daß das Product der Function $f(x_1, x_2, \dots x_n)$ und einer an der Stelle $(x^{(0)})$ verschwindenden Potenzreihe $\mathfrak{P}_2'(x_1, x_2, \dots x_n | (x^{(0)}))$ in der Umgebung von $(x^{(0)})$ regulär und für $x_\nu = x_\nu^{(0)}$ ($\nu = 1, 2, \dots n$) Null wird. Will man aber erfahren, ob diese Bedingung auch hinreichend ist, so muß man aus

$$f \cdot \mathfrak{P}_2' = \mathfrak{P}_1'(x_1, x_2, \dots x_n | (x^{(0)}))$$

den Quotienten

$$\frac{\mathfrak{P}_1'}{\mathfrak{P}_2'}$$

entnehmen und erst fragen, wie sich dieser verhält. Man gelangt also zu einem Ausdruck, dessen Untersuchung wir schon früher verschoben haben, als es sich darum handelte, aus gegebenen Potenzreihen neue abzuleiten (S. 155). Auch hier genüge uns vorderhand der Begriff der analytischen Function mehrerer Variablen. —

In diesem Capitel soll nur noch einer Reihe von Functionen gedacht werden, die zugleich mit einer analytischen Function existiren: wir meinen die *Ableitungen*.

Wir wissen, daß das einzelne Element einer Function:

$$\mathfrak{P}(x|a) = \sum_{v=0}^{\infty} \alpha_v (x - a)^v$$

eine bestimmte Ableitung besitzt:

$$\mathfrak{P}'(x|a) = \sum_{v=1}^{\infty} v \alpha_v (x - a)^{v-1},$$

die zum mindesten ebenso lange convergirt als die gegebene Reihe; es muß aber untersucht werden, ob die Ableitungen der Fortsetzungen von $\mathfrak{P}(x|a)$ auch Fortsetzungen von $\mathfrak{P}'(x|a)$ sind oder ob die Ableitungen aller Elemente einer monogenen analytischen Function selbst eine monogene analytische Function constituiren. *)

Diese Frage beantwortet man damit bejahend, daß man zeigt, die Ableitung der durch Vermittlung von Stellen a_1, a_2, \dots, a_n gewonnenen Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x|a, a_1, a_2, \dots, a_n, x_0) = \sum_{v=1}^{\infty} \beta_v (x - x_0)^v$$

ist identisch mit der auf demselben Wege ermittelten Fortsetzung von $\mathfrak{P}'(x|a)$, nämlich mit

$$\mathfrak{P}'(x|a, a_1, a_2, \dots, a_n, x_0).$$

Man hat den Beweis nur für direct ableitbare Reihen zu erbringen. Wir stellen also die Reihe

$$\mathfrak{P}(x|a, a_1) = \sum_{v=0}^{\infty} \alpha_v (a_1 - a + (x - a_1))^v = \sum_{v=0}^{\infty} \beta_v (x - a_1)^v$$

auf, bilden die Ableitung und zeigen deren Identität mit

$$\mathfrak{P}'(x|a, a_1) = \sum_{v=0}^{\infty} v \alpha_v (a_1 - a + (x - a_1))^{v-1} = \sum_{v=0}^{\infty} \beta'_v (x - a_1)^{v-1}.$$

Die Reihen $\mathfrak{P}(x|a)$ und $\mathfrak{P}(x|a, a_1)$ besitzen einen gemeinsamen Convergenzbereich. Sind x und $x + h$ zwei Stellen dieses Bereiches, so entsteht beim Ordnen der Reihe $\sum_{v=0}^{\infty} \alpha_v (a - a_1 + (x + h - a_1))^v$ nach Potenzen von h :

$$\mathfrak{P}(x + h|a, a_1) = \mathfrak{P}(x|a) + \mathfrak{P}'(x|a) \cdot h + h^2 \cdot \mathfrak{P}_1(x|h),$$

wo auch $\mathfrak{P}_1(x|h)$ mit h unendlich klein wird.

Die genannten Ausdrücke stimmen in einer Umgebung von x überein. Da aber dort $\mathfrak{P}(x|a)$ und $\mathfrak{P}(x|a, a_1)$ dieselben Werthe ergeben und daselbst

*) Siehe Pincherle 2. Theil § 31.

$$\mathfrak{P}_1(x|a, a_1) - \mathfrak{P}'(x|a) = \mathfrak{P}(x, h) - \mathfrak{P}_1(x, h)$$

mit h beliebig klein wird, werden die Reihen $\mathfrak{P}_1(x|a, a_1)$ und $\mathfrak{P}'(x|a_1)$ an allen Stellen einer hinlänglich kleinen Umgebung von x dieselben Werthe annehmen. Indem nun noch $\mathfrak{P}'(x|a)$ und $\mathfrak{P}'(x|a, a_1)$ in dem genannten Bereiche übereinstimmen, werden die nach denselben Potenzen fortschreitenden Reihen $\mathfrak{P}_1(x|a, a_1)$ und $\mathfrak{P}'(x|a, a_1)$ identisch.

Damit ist der Satz begründet, daß die erste Ableitung und dann auch jede folgende eine monogene analytische Function ist. Ob diese Derivirten ebenso vieldeutig sein werden wie die gegebene Function, ist a priori nicht zu entscheiden, nur die Derivirte einer eindeutigen Function ist gewiß wieder eindeutig.

Derselbe Satz gilt auch für die verschiedenen partiellen Derivirten einer analytischen Function mehrerer Variablen $f(x_1, x_2, \dots x_n)$, deren Differentialänderung $df(x_1, x_2, \dots x_n)$ durch die Summe

$$\sum_{v=1}^n f_v(x_1, x_2, \dots x_n) dx_v = \sum_{v=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_v} dx_v$$

definirt ist. Sind die Gröfßen $x_1, x_2, \dots x_n$ selbst analytische Functionen neuer Variablen

$$x_v = \varphi_v(y_1, y_2, \dots y_m),$$

so wird

$$dx_v = \sum_{\mu} \frac{\partial \varphi_v}{\partial y_{\mu}} dy_{\mu}$$

und

$$df(x_1, x_2, \dots x_n) = \sum_{\mu, v} \frac{\partial f}{\partial x_v} \frac{\partial \varphi_v}{\partial y_{\mu}} dy_{\mu}.$$

Viertes Capitel.

Über den Umfang des Begriffes der analytischen Function.

I. Abschnitt.

Theorie der algebraischen Gleichungen.

§ 36. Einleitung.

Mit den bisherigen Definitionen hat die allgemeine Functionentheorie insoweit einen bestimmten Inhalt, als genau formulirt ist, was für veränderliche Größen als Functionen bezeichnet werden; doch der bestimmt gewählte Begriff einer analytischen Function wird erst dadurch von Bedeutung, daß man die durch irgend einen arithmetischen Zusammenhang definirten Größen als analytische Functionen erkennen lernt. Wenn aber einmal gezeigt ist, daß der Functionsbegriff die irgendwo in Rechnung tretenden Größen wirklich umfaßt und nicht zu eng gewählt ist, dann kann man andererseits bei der Frage nach Größen von bestimmt analytisch ausdrückbarer Eigenschaft stets verlangen, daß die gesuchte Größe in einem endlichen, wenn auch noch so kleinem Bereiche der unabhängigen Variabeln eine analytische Function, und dort als solche durch eine convergente Potenzreihe darstellbar sei. Aus der primitiven Reihe, deren unbestimmte Coefficienten mit Hilfe der Voraussetzung bestimmt werden, daß das Element die Eigenschaft der gesuchten Function besitze, geht durch Fortsetzung eine analytische Function hervor, welche in ihrem ganzen Geltigkeitsbereich die verlangte Beschaffenheit aufweist, wenn die gefundene Potenzreihe wirklich convergent ist. Wir ziehen dabei gewiß nur Zahlengrößen in Betracht, welche in der arithmetischen Einleitung als in der Rechnung zulässige bezeichnet waren.

Nach dieser kurzen Andeutung zweier Aufgaben der Functionentheorie, die den Gang für die ferneren Untersuchungen vorzeichnen, wenden wir uns gleich zu der Frage, ob eine von n unabhängig veränderlichen Größen x_1, x_2, \dots, x_n abhängige Größe y , welche durch eine Gleichung m^{ten} Grades in y definirt sei, in welcher die Coefficienten

eindeutige analytische Functionen sein mögen, eine analytische Function ist.

Die Gleichung laute:

$$F(y, x_1, x_2, \dots, x_n) = y^m \psi_0(x_1, x_2, \dots, x_n) + y^{m-1} \psi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + \dots \\ \dots + \psi_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0.$$

Wir wissen bereits, daß jedem Werthesysteme der Variablen (x_1, x_2, \dots, x_n) , für welches die Coefficienten ψ endliche Werthe besitzen, im Allgemeinen m von einander verschiedene Werthe y zugehören. Die GröÙe y ist also m -deutig, doch weil einer ihrer Werthe an der Stelle $(x^{(0)})$ unendlich wird, wenn diese eine Unendlichkeitsstelle eines der Coefficienten $\frac{\psi_\mu}{\psi_0}$ ist, so müssen die m Functionen

$$\frac{\psi_\mu}{\psi_0} \quad (\mu = 1, 2, \dots, m)$$

einen gemeinsamen Stetigkeitsbereich besitzen. Werden die letzten $(m - n)$ dieser Functionen an einer und derselben Stelle $(x^{(0)})$ ihres Stetigkeitsbereiches unendlich klein, $\frac{\psi_n}{\psi_0}$ aber nicht, so nimmt die aus der Gleichung

$$y^m + \frac{\psi_1}{\psi_0} y^{m-1} + \dots + \frac{\psi_m}{\psi_0} = 0 \quad (\alpha)$$

hervorgehende GröÙe y an der Stelle $(x^{(0)})$ $(m - n)$ unendlich kleine Werthe an. Im Falle $n = m - 1$ haben wir diese Behauptung als richtig erkannt und wenn wir sie als zutreffend ansehen, sofern die letzten $m - n - 1$ Coefficienten $\frac{\psi_\mu}{\psi_0}$ unendlich klein sind, so folgt sie auch in dem genannten Falle.

In der That: bezeichnet y' eine der $(m - n - 1)$ unendlich kleinen Wurzeln, die nun existiren, so genügen alle übrigen Lösungen der neuen Gleichung

$$\left(y^m + \frac{\psi_1}{\psi_0} y^{m-1} + \dots + \frac{\psi_m}{\psi_0} \right) : (y - y') = 0.$$

Da aber in dem Resultate der Division:

$$\frac{F(y) - F(y')}{y - y'} = \frac{y^m - y'^m}{y - y'} + \frac{\psi_1}{\psi_0} \frac{y^{m-1} - y'^{m-1}}{y - y'} + \dots \\ \dots + \frac{\psi_{m-2}}{\psi_0} \frac{y^2 - y'^2}{y - y'} + \frac{\psi_{m-1}}{\psi_0} \frac{y - y'}{y - y'} \\ = \sum_{\mu=1}^m y^{m-\mu} y'^{\mu-1} + \frac{\psi_1}{\psi_0} \sum_{\mu=2}^m y^{m-\mu} y'^{\mu-2} + \dots + \frac{\psi_{m-1}}{\psi_0} \sum_{\mu=m}^m y^{m-\mu} y'^{\mu-m},$$

wenn dasselbe noch nach abnehmenden y -Potenzen geordnet wird, die letzten $(m - n - 1)$ Coefficienten unendlich klein werden, hat die Gleichung (α) wirklich $(m - n)$ unendlich kleine Wurzeln.

Fasst man die ursprüngliche Gleichung ins Auge, so kann man nur sagen, y hat an einer Stelle $(x^{(0)})$ des gemeinsamen Stetigkeitsbereiches der $(m+1)$ Functionen ψ ($m-n$) unendlich kleine Wurzeln, wenn die letzten $(m-n)$ Coefficienten ψ daselbst unendlich kleine Werthe annehmen und $\psi_0(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ nicht unendlich klein ist.

In ähnlicher Weise zeigt man, daß n Wurzeln y unendlich groß werden, wenn die ersten n Coefficienten $\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_{n-1}$ unendlich kleine Werthe annehmen und keiner der übrigen Coefficienten unendlich groß ist.

Damit ist auch leicht bewiesen, daß die endlichen Wurzeln

$$y_1^{(0)}, y_2^{(0)} \dots y_m^{(0)},$$

welche einer Stelle $(x^{(0)})$ des Stetigkeitsbereiches der Coefficienten entsprechen, mit den Coefficienten stetig veränderlich sind. Denn wählen wir in einer Umgebung von $(x^{(0)})$ eine Stelle $(x^{(0)} + \xi)$, an welcher x_0 von Null verschieden ist, so werden in den zugehörigen Wurzeln

$$y_\mu^{(0)} + \eta_\mu \quad (\mu = 1, 2 \dots m)$$

die Incremente η_μ mit den ξ_ν unendlich klein. Substituirt man zunächst in $F(y, x_1, x_2, \dots, x_n)$ an Stelle von $x_\nu, x_\nu + \xi_\nu$, so entsteht eine Gleichung:

$$y^m(\psi_0)_{x^{(0)}} + y^{m-1}(\psi_1)_{x^{(0)}} + \dots + (\psi_m)_{x^{(0)}} + y^m \chi_0 + y^{m-1} \chi_1 + \dots \\ \dots + \chi_m = 0,$$

wo $(\psi_\mu)_{x^{(0)}}$ für $\psi_\mu(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ gesetzt ist und χ_μ Functionen von $\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n$ sind, die mit diesen Größen unendlich klein werden. Hier gibt die Substitution von $y_\mu^{(0)} + \eta_\mu$ an Stelle von $y_\mu^{(0)}$ einen Ausdruck der Gestalt:

$$F(\eta, x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Phi(\eta_\mu, \xi_1, \xi_2 \dots \xi_n) = 0,$$

worin Φ mit den ξ_ν und F mit η_μ unendlich klein wird, so daß einer der Werthe von η_μ gewiß nach Null convergirt. Weil das aber für jedes η_μ zutrifft, so erscheint wirklich die unendlich kleine Werthänderung der Coefficienten, bei welcher ψ_0 nicht Null wird, mit einer unendlich kleinen Änderung der Werthe von y verbunden, d. h. die Wurzeln einer Gleichung $F=0$ ändern sich stetig mit den Coefficienten, solange wir uns auf die Umgebung solcher Stellen des gemeinsamen Stetigkeitsbereiches der letzteren beschränken, für die der Coefficient der höchsten y -Potenz nicht verschwindet.

Diese Eigenschaft der zu untersuchenden m -deutigen Größe haben wir hier vorausgeschickt, um uns in dem Falle einer algebraischen Gleichung:

$$G(y, x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{\mu=0}^m y^{m-\mu} f_\mu(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0,$$

wo die Coefficienten ganze rationale Functionen sind, gleich über die Unendlichkeitsstellen der Function y orientiren zu können, in deren Umgebung y gewiß nicht durch Potenzreihen darstellbar ist. Wir denken die rationalen Functionen f_μ von gemeinsamen Theilern befreit, dann sind die im Endlichen liegenden Nullstellen von $f_0(x_1, x_2, \dots x_n)$ Stellen, in deren Umgebung wir die Stetigkeit von y nicht erschließen können.

Wir setzen ferner fest, daß $G(y, x_1, x_2, \dots x_n)$ nicht in das Product mehrerer Functionen $G_\mu(y, x_1, x_2, \dots x_n)$, deren Coefficienten wieder ganze rationale Functionen der unabhängigen Variablen sind, zerlegbar oder *nicht reductibel* sei, denn andernfalls würden wir die Gleichungen $G_\mu = 0$ untersuchen und die hieraus bestimmten Größen y genügten gewiß der gegebenen Gleichung $G = 0$.

Die wahre Bedeutung der *irreductiblen ganzen rationalen Function* $G(y, x_1, x_2, \dots x_n)$ erschließt der folgende Satz:

Sind $G(y, x_1, x_2, \dots x_n)$ und $F(y, x_1, x_2, \dots x_n)$ zwei ganze rationale Functionen der $(n+1)$ Variablen $y, x_1, x_2, \dots x_n$ und ist G irreductibel, haben aber die Gleichungen

$$G = 0, \quad F = 0$$

für jedes Werthesystem $x_\nu = a_\nu$ ($\nu = 1, 2, \dots n$) in der Umgebung einer Stelle

$$y^{(0)}, x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots x_n^{(0)}$$

eine gemeinsame Lösung, so ist F durch G theilbar.

Andernfalls gäbe es nämlich zwei ganze rationale Functionen:

$$\Phi(y, x_1, x_2, \dots x_n), \quad \Psi(y, x_1, x_2, \dots x_n),$$

deren Grad in y niedriger ist als der der gegebenen Functionen F und G , und für diese wäre

$$F\Psi - G\Phi$$

eine rationale Function der n Variablen $x_1, x_2, \dots x_n$ $R(x_1, x_2, \dots x_n)$, die nicht identisch verschwindet. Eine Gleichung

$$F\Psi - G\Phi = R$$

ist aber nicht mit der Annahme verträglich, daß F und G an jeder Stelle einer Umgebung von $(x^{(0)})$ gleichzeitig verschwinden, es muß also

$$F\Psi - G\Phi = 0,$$

und F durch G theilbar sein. —

Man kann diesen Satz natürlich dahin abändern, daß man festsetzt, $F = 0$ und $G = 0$ haben für unendlich viele Stellen (x) mit der Häufungsstelle $(x^{(0)})$ eine Wurzel gemein.

Sind G und F ganze rationale Functionen einer Variablen allein, so ist nur nöthig, daß die irreductiblen Gleichungen $G(y)=0$ und $F(y)=0$ eine gemeinsame Wurzel $y = y^{(0)}$ besitzen, dann ist schon F durch G

theilbar und die Gleichung $F = 0$ hat alle Wurzeln, welche der Gleichung $G = 0$ zukommen. —

Wenn aus der irreductiblen algebraischen Gleichung

$$G(y, x_1, x_2, \dots x_n) = 0$$

für ein bestimmtes Werthesystem der unabhängigen Variablen

$$x_1 = a_1, x_2 = a_2 \dots x_n = a_n$$

eine endliche Wurzel $y = b$ hervorgeht, so ist

$$G(y, a_1, a_2, \dots a_n) = \left(\frac{\partial G}{\partial y} \right) \frac{(y-b)}{1!} + \left(\frac{\partial^2 G}{\partial y^2} \right) \frac{(y-b)^2}{2!} + \dots + \left(\frac{\partial^m G}{\partial y^m} \right) \frac{(y-b)^m}{m!},$$

wo $\left(\frac{\partial^\mu G}{\partial y^\mu} \right)$ den Werth des μ^{ten} Differentialquotienten von G nach y für $x_\nu = a_\nu$ ($\nu = 1, 2 \dots n$) und $y = b$ bezeichnet. Verschwindet $\left(\frac{\partial G}{\partial y} \right)$ an dieser Stelle, so ist $y = b$ eine zweifache Wurzel. Wir haben aber schon bemerkt, daß mehrfache Stellen (a) für eine m -deutige analytische Function auch Stellen sein können, wo für dieselbe nicht m Potenzreihen existiren. Wenn wir daher beweisen wollen, daß die durch eine Gleichung $G = 0$ definirte Gröfse y eine analytische Function ist, so werden wir, solange als es sich um den Nachweis handelt, daß y in der Umgebung einer Stelle (x) des Stetigkeitsbereiches der Coefficienten $f_\mu(x_1, x_2, \dots x_n)$ in eine Potenzreihe zu entwickeln sei, nicht allein die Nullstellen von $f_0(x_1, x_2, \dots x_n)$, sondern auch diejenigen Stellen (x) ausschließen, für welche die Gleichungen

$$G = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial G}{\partial y} = 0$$

gleichzeitig bestehen. Man findet diese Stellen, indem man die Nullstellen der Resultante von G und $\frac{\partial G}{\partial y}$, oder was gleichbedeutend ist, die Nullstellen der Discriminante von G sucht. Diese Discriminante

$$D(x_1, x_2, \dots x_n)$$

wird keinesfalls identisch verschwinden, weil vorausgesetzt war, daß G eine irreductible Function ist und G nicht durch $\frac{\partial G}{\partial y}$ theilbar sein kann. Umgekehrt werden aber den Nullstellen von D mehrfache Lösungen von y entsprechen, und gleiche Wurzeln y können nur an solchen Stellen bestehen, wo die Discriminante verschwindet.

Die Gesamtheit der zusammengehörigen Werthesysteme

$$(x_1, x_2, \dots x_n, y),$$

welche die algebraische Gleichung erfüllen, nennt Weierstraß das durch die Gleichung definirte *algebraische Gebilde* im $(2n + 2)$ -fach aus-

gedehnten Gebiete der Größen x_1, x_2, \dots, x_n, y und eines der Werthesysteme eine *Stelle des Gebildes*.

Ist $x_1 = a_1, x_2 = a_2, x_n = a_n$ ein Werthesystem, dem m von einander verschiedene endliche Stellen

$$(a_1, a_2, \dots, a_n, b_\mu) \quad \mu = 1, 2 \dots m.$$

zugehören, und setzt man darauf

$$x_\nu = a_\nu + \xi_\nu \quad (\nu = 1, 2 \dots n), \quad y = b_\mu + \eta_\mu,$$

so geht die Gleichung $G = 0$ in die folgende über:

$$\begin{aligned} G(b_\mu + \eta_\mu, a_1 + \xi_1, a_2 + \xi_2, \dots, a_n + \xi_n) = \\ = \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right) \eta_\mu + \left(\frac{\partial G}{\partial x_1}\right) \xi_1 + \left(\frac{\partial G}{\partial x_2}\right) \xi_2 + \dots \\ \dots + \left(\frac{\partial G}{\partial x_n}\right) \xi_n + \sum_{\nu=1}^n (\eta_\mu, \xi_1, \xi_2 \dots \xi_n)_\nu, \end{aligned}$$

wo $(\eta_\mu, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)_\nu$ die Summe über alle aus $\eta_\mu, \xi_1, \dots, \xi_n$ gebildeten Glieder ν ter Dimension bedeutet. Es entsteht also eine Gleichung der Form

$$\eta_\mu^m \varphi_0(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) + \eta_\mu^{m-1} \varphi_1(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) + \dots + \varphi_m(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = 0,$$

deren Coefficienten φ_m und φ_{m-1} die Eigenschaft haben, für

$$\xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_n = 0$$

die Werthe Null respective $\left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)$ anzunehmen.

Und nun gehen wir an die Aufgabe, η_μ oder $y - b_\mu$ in der Umgebung der Stelle $\xi_1 = 0, \xi_2 = 0, \dots, \xi_n = 0$ resp.

$$x_1 = a_1, x_2 = a_2, \dots, x_n = a_n$$

in eine convergente Potenzreihe

$$\mathfrak{P}_\mu(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = \mathfrak{P}_\mu(x_1, x_2, \dots, x_n | (a))$$

zu entwickeln. Entsprechend den m Wurzeln b_μ werden wir m simultane Elemente:

$$y = b_\mu + \mathfrak{P}_\mu(x_1, x_2, \dots, x_n | (a)) \quad (\mu = 1, 2 \dots m)$$

erhalten, welche in ihrem gemeinsamen Convergenzbereiche die m -deutige durch die Gleichung $G = 0$ definirte Grösse y vollständig bestimmen.

§ 37. Darstellung der Wurzeln einer algebraischen Gleichung.

Zum Beweise der Existenz einer Potenzreihe für die durch eine algebraische Gleichung $G(y, x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ definirte Grösse y in der Umgebung einer Stelle (x) , die weder Nullstelle der Discriminante, noch Nullstelle der bei der höchsten Potenz von y stehenden

ganzen rationalen Function ist, suche man ein Verfahren, durch welches man die Wurzel einer Gleichung

$$f(z) = \alpha_0 z^m + \alpha_1 z^{m-1} + \dots + \alpha_{m-1} z + \alpha_m = 0$$

bestimmt, wo $|\alpha_0|$ und $|\alpha_{m-1}|$ nicht unendlich klein sind und die übrigen Coefficienten dem absoluten Betrage nach kleiner bleiben als eine angebbare GröÙe.

HeiÙen die m von einander verschiedenen endlichen Wurzeln der Gleichung $f(z) = 0$

$$z_1, z_2, \dots, z_m,$$

so wird

$$f(z) = \alpha_0 (z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_m)$$

$$\frac{f'(z)}{f(z)} = \frac{1}{z - z_1} + \frac{1}{z - z_2} + \dots + \frac{1}{z - z_m}.$$

Bezeichnet ferner ξ eine von z_1, z_2, \dots, z_m verschiedene endliche GröÙe, und bildet man

$$\frac{f'(z)}{f(z)} = \frac{f'(\xi) + f''(\xi) \frac{z - \xi}{1} + \dots + f^{(m-1)}(\xi) \cdot \frac{(z - \xi)^{m-1}}{(m-1)!}}{f(\xi) + f'(\xi) \frac{z - \xi}{1} + \dots + f^{(m)}(\xi) \cdot \frac{(z - \xi)^m}{m!}}$$

und

$$\frac{f'(z)}{f(z)} = \sum_{\mu=1}^m \frac{1}{z - z_\mu} = - \sum_{\mu=1}^m \frac{1}{(z_\mu - \xi) \left(1 - \frac{z - \xi}{z_\mu - \xi}\right)},$$

vergleicht hierauf die Coefficienten gleich hoher Potenzen von $(z - \xi)$ in den für diese Ausdrücke geltenden Potenzreihen, die gewiß in einer Umgebung von $z = \xi$ übereinstimmen, so wird der Coefficient der Potenz $(z - \xi)^\lambda$:

$$\left[\frac{f'(z)}{f(z)} \right]_{(z-\xi)^\lambda} = - \sum_{\mu=1}^m \frac{1}{(z_\mu - \xi)^{\lambda+1}}.$$

Da dieser Ausdruck in den Wurzeln z_1, z_2, \dots, z_m symmetrisch ist, wird er als rationale Function von ξ und den Coefficienten von $f(z)$ darzustellen sein. Dasselbe gilt dann auch für den Quotienten aufeinanderfolgender Entwicklungscoefficienten:

$$\frac{\sum_{\mu=1}^m (z_\mu - \xi)^{-\lambda}}{\sum_{\mu=1}^m (z_\mu - \xi)^{-\lambda-1}} = R_\lambda(\xi),$$

der auf die Form

$$R_1(\xi) = (z_v - \xi) \frac{\sum_{\mu=1}^m \left(\frac{z_v - \xi}{z_\mu - \xi} \right)^2}{\sum_{\mu=1}^m \left(\frac{z_v - \xi}{z_\mu - \xi} \right)^{2+1}}$$

gebracht werden mag.

Der Convergenzkreis der die eindeutige Function $\frac{f'(s)}{f(s)}$ in der Umgebung der Stelle $s = \xi$ darstellenden Potenzreihe geht durch die dieser Stelle nächstliegende Nullstelle von $f(x)$, sie heie z_v . Dann sind die absoluten Betre von

$$\frac{z_v - \xi}{z_\mu - \xi} \quad (\mu = 1, 2, \dots, v-1, v+1, \dots, m)$$

kleiner als Eins und der gröste sei ε . Bestimmt man nun eine positive ganze Zahl λ derart, daß

$$(m-1)\varepsilon^{\lambda+1} < 1$$

wird, so kann man den absoluten Betrag von $R_1(\xi) - (z_v - \xi)$ kleiner machen als

$$|z_v - \xi| \cdot \left(\frac{1 + (m-1)\varepsilon^2}{1 - (m-1)\varepsilon^{\lambda+1}} - 1 \right) \quad \text{und} \quad |z_v - \xi| \cdot \frac{2(m-1)\varepsilon^2}{1 - (m-1)\varepsilon^{\lambda+1}}.$$

Fst man ferner in der durch die Bedingungen

$$\left| \frac{z_v - \xi}{z_\mu - \xi} \right| < 1 \quad (\mu = 1, 2, \dots, v-1, v+1, \dots, m)$$

definierten Umgebung einer Stelle $(\xi, z_1, z_2, \dots, z_m)$ denjenigen Bereich auf, wo die obere Grenze ε der absoluten Betre der aus den als variabel gedachten Gren $\xi, z_1, z_2, \dots, z_m$ gebildeten Ausdrücke

$\frac{z_v - \xi}{z_\mu - \xi}$ kleiner ist als Eins, so wird für alle Stellen dieses Bereiches

$$|R_1(\xi) - (z_v - \xi)| < |z_v - \xi| \frac{2(m-1)\varepsilon^2}{1 - (m-1)\varepsilon^{\lambda+1}}$$

und jetzt kann man eine ganze Zahl λ so finden, daß

$$R_1(\xi) + \xi$$

für alle Stellen des genannten Bereiches die Wurzel z_v so genau angibt, als man nur will. Man sieht, daß in derjenigen Umgebung einer Stelle $(\xi, z_1, z_2, \dots, z_m)$, wo $|z_v - \xi|$ kleiner ist als jede der übrigen Gren $|z_\mu - \xi|$, $R_1(\xi) + \xi$ für ein λ , das größer ist als jede angebbare Gre, gleichmäßig convergirt und gleich z_v ist. Ersetzt man den gefundenen Ausdruck für die Wurzel z_v durch

$$\xi + R_1(\xi) + (R_2(\xi) - R_1(\xi)) + (R_3(\xi) - R_2(\xi)) + \dots$$

und entwickelt die rationalen Functionen $R_1(\xi)$ von ξ und den Coeffizienten der Function $f(s)$ nach Potenzen von ξ , so wird auch die

Wurzel z , durch eine (nach Potenzen von z fortschreitende) convergente Potenzreihe darzustellen sein, denn man kann die gleichmäßig convergente Summe unendlich vieler rationaler Functionen selbst in eine convergente Potenzreihe umformen.

Diese von H. Runge herrührende *Entwicklung der Wurzeln einer algebraischen Gleichung in Summen rationaler Functionen der Coefficienten* *) ist nicht mehr anwendbar, wenn $f(z)$ keine ganze rationale, sondern eine ganze transcendente Function oder das Element einer analytischen Function ist; und weil wir diese Fälle auch in Betracht ziehen müssen, wollen wir die verlangte Entwicklung einer Wurzel auf dem von H. Weierstraß in seinen Vorlesungen eingehaltenen Wege direct ableiten, denn auf diesem ist die genannte Verallgemeinerung möglich.

Entnimmt man der Gleichung

$$f(z) = \alpha_0 z^m + \alpha_1 z^{m-1} + \dots + \alpha_m = 0$$

die Beziehung:

$$z = - \left(\frac{\alpha_m}{\alpha_{m-1}} + \frac{\alpha_{m-2}}{\alpha_{m-1}} z^2 + \dots + \frac{\alpha_0}{\alpha_{m-1}} z^m \right)$$

oder

$$z = b + b_2 z^2 + b_3 z^3 + \dots + b_m z^m = g(z),$$

so handelt es sich um die Ermittlung eines Werthes z' , welcher die Gleichung

$$z' = g(z')$$

identisch erfüllt. Um z' zu finden, suche man eine Folge von Zahlengrößen

$$z_0, z_1, z_2, \dots, z_\mu, \dots,$$

die eine Fundamentalreihe constituiren und deren Terme die verlangte Eigenschaft, nämlich der Gleichung $z = g(z)$ zu genügen, immer näher und näher erfüllen. Dann wird

$$z_0 - g(z_0), z_1 - g(z_1), \dots, z_\mu - g(z_\mu)$$

eine Elementarreihe, und die Grenze der Fundamentalreihe z' ist die verlangte Wurzel der Gleichung $f(z) = 0$.

Das erste Glied z_0 einer Reihe von Größen sei Null, z_1 sei $g(z_0)$ oder b , $z_2 = g(z_1) = b + b_2 b^2 + \dots + b_m b^m$ usw., $z_\mu = g(z_{\mu-1})$. Es ist zu zeigen, daß die so definirte Größenmenge, deren einzelnes Glied eine ganze Function von b und b_2, b_3, \dots, b_m wird und nur positive ganzzahlige Coefficienten enthält, eine Fundamentalreihe ausmacht.

Wenn man

$$z_{\mu+1} - z_\mu = (z_\mu - z_{\mu-1}) f_\mu$$

setzt, wird

*) Siehe Acta mathematica Bd. 6, S. 305

$$f_\mu = \frac{g(z_\mu) - g(z_{\mu-1})}{z_\mu - z_{\mu-1}} = b_2 \frac{z_\mu^2 - z_{\mu-1}^2}{z_\mu - z_{\mu-1}} + b_3 \frac{z_\mu^3 - z_{\mu-1}^3}{z_\mu - z_{\mu-1}} + \dots$$

$$\dots + b_m \frac{z_\mu^m - z_{\mu-1}^m}{z_\mu - z_{\mu-1}}$$

und

$$\begin{aligned} z_1 - z_0 &= b \\ z_2 - z_1 &= b f_1 \\ z_3 - z_2 &= b f_1 f_2 \\ &\dots \\ z_{\mu+1} - z_\mu &= b f_1 f_2 \dots f_\mu \end{aligned}$$

und die Addition dieser Gleichungen ergibt:

$$z_{\mu+1} = b(1 + f_1 + f_1 f_2 + \dots + f_1 f_2 \dots f_\mu).$$

Hier läßt sich nun beweisen, daß $z_{\mu+1}$ für ein unendlich wachsendes μ endlich bleibt und

$$\lim (z_{\mu+1} - z_\mu) = \lim (g(z_\mu) - z_\mu) = 0$$

ist.

Ersetzt man $b_2, b_3 \dots b_m$ durch bestimmte positive Größen $\beta_2, \beta_3 \dots \beta_m$, wo

$$\beta_2 \geq |b_2|, \quad \beta_3 \geq |b_3|, \quad \dots \quad \beta_m \geq |b_m|$$

ist, und b durch eine noch unbestimmt gelassene positive Größe β , bezeichnet die diesen Größen entsprechenden Functionen f_μ und Größen z_μ durch griechische Buchstaben, so wird

$$\xi_\mu > \xi_{\mu-1}$$

und deswegen

$$\begin{aligned} \varphi_\mu &= \sum_{\nu=2}^m \beta_\nu \frac{\xi_\mu^\nu - \xi_{\mu-1}^\nu}{\xi_\mu - \xi_{\mu-1}} = \sum_{\nu=2}^m \beta_\nu (\xi_\mu^{\nu-1} + \xi_\mu^{\nu-2} \xi_{\mu-1} + \dots + \xi_{\mu-1}^{\nu-1}) < \\ &< 2\beta_2 \xi_\mu + 3\beta_3 \xi_\mu^2 + \dots + m\beta_m \xi_\mu^{m-1} = \gamma'(\xi_\mu). \end{aligned}$$

Bezeichnet ferner ε eine beliebig kleine positive Größe und wählt man die positive Größe β derart, daß

$$2\beta_2 \beta (1 + \varepsilon) + 3\beta_3 \beta^2 (1 + \varepsilon)^2 + \dots + m\beta_m \beta^{m-1} (1 + \varepsilon)^{m-1} < \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon},$$

— was gewiß stets angeht — so ist jede Größe ξ_μ und das zugehörige φ_μ kleiner als

$$\beta(1 + \varepsilon) \quad \text{beziehungsweise} \quad \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon},$$

denn erstens ist

$$\xi_1 = \beta < \beta(1 + \varepsilon), \quad \varphi_1 = \beta_2 \beta + \beta_3 \beta^2 + \dots + \beta_m \beta^{m-1} < \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}$$

und wenn die genannten Ungleichungen für $\xi_2, \xi_3 \dots \xi_\mu$ und $\varphi_2, \varphi_3, \dots \varphi_\mu$ erfüllt sind, wird zweitens

$$\begin{aligned}\xi_{\mu+1} &= \beta(1 + \varphi_1 + \varphi_1 \varphi_2 + \dots + \varphi_1 \varphi_2 \dots \varphi_\mu) < \beta \left(1 + \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} + \dots + \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right)^\mu\right) \\ &< \beta \frac{1}{1 - \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}} = \beta(1 + \varepsilon),\end{aligned}$$

$$\varphi_{\mu+1} < 2\beta_2\beta(1+\varepsilon) + 3\beta_3\beta^2(1+\varepsilon)^2 + \dots + m\beta_m\beta^{m-1}(1+\varepsilon)^{m-1} < \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon},$$

d. h. die Ungleichungen gelten für jedes ξ_μ und φ_μ und es ist auch:

$$\xi' = \lim \xi_\mu = \beta(1 + \varphi_1 + \varphi_1 \varphi_2 + \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 + \dots) < \beta(1 + \varepsilon).$$

Dann aber muß in dem Bereiche, wo

$$|b| \leq \beta, \quad |b_\nu| \leq \beta_\nu \quad (\nu = 2, 3 \dots m)$$

die Reihe

$$s' = \lim s_\mu = b(1 + f_1 + f_1 f_2 + f_1 f_2 f_3 + \dots)$$

unbedingt und gleichmäßig convergiren, denn die Differenz

$$s_{\mu+1} - s_\mu = g(s_\mu) - s_\mu = b f_1 f_2 \dots f_\mu$$

kann dem absoluten Betrage nach kleiner gemacht werden als

$$\beta \left(\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}\right)^\mu$$

und bei wachsendem μ kleiner als jede noch so kleine GröÙe δ .

Substituiert man für die GröÙen f_μ ihre Ausdrücke:

$$\begin{aligned}f_1 &= b_2 b + b_3 b^2 + \dots + b_m b^{m-1} \\ f_2 &= b'_2 b + b'_3 b^2 + \dots + b'_{m(m-1)} b^{m(m-1)} \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots\end{aligned}$$

welche alle ganze Functionen von b sind, so folgt für s' eine nach Potenzen von b fortschreitende convergente Potenzreihe

$$s' = b\mathfrak{P}(b),$$

deren Coefficienten ganze Ausdrücke in $b_2, b_3, \dots b_m$ mit ganzzahligen Coefficienten sind. $\mathfrak{P}(0)$ ist gleich 1, denn die Gleichung

$$s = b + b_2 s^2 + \dots + b_m s^m$$

muß durch s' identisch erfüllt sein.

Jetzt ist nachgewiesen, daß zum mindesten eine Wurzel einer Gleichung $f(s) = 0$ durch ZahlengröÙen der eingeführten Art darstellbar ist und dann ist es auch jede andere. Es ist aber auch klar, daß man aus der Gleichung

$$f(s) = \alpha_0 s^m + \alpha_1 s^{m-1} + \dots + \alpha_{m-1} s + \alpha_m = Z$$

stets eine in gewissem Bereiche um α_m convergente Potenzreihe

$$s = \mathfrak{P}(Z - \alpha_m)$$

entwickeln kann, die für jeden innerhalb des Convergenzkreises liegenden

Werth Z_0 einen Werth z_0 gibt, welcher die Gleichung $f(z) - Z_0 = 0$ erfüllt; es muß nur $|\alpha_{m-1}| > 0$ sein.

Ersetzt man $f(z)$ durch eine in der Umgebung R der Stelle $z = 0$ convergente Potenzreihe

$$Z = \sum_{\mu=0}^{\infty} \alpha_{\mu} z^{\mu},$$

wo α_1 von Null verschieden ist und bildet man

$$z = \frac{Z - \alpha_0}{\alpha_1} - \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} z^2 + \frac{\alpha_3}{\alpha_1} z^3 + \dots \right),$$

so ist auch diese Gleichung durch eine für $Z = \alpha_0$ verschwindende convergente Potenzreihe

$$z = \mathfrak{P}(Z - \alpha_0)$$

identisch zu erfüllen, wenn nur die Coefficienten $-\frac{\alpha_r}{\alpha_1} = b_r$ kleiner sind als die positiven Coefficienten $\beta_2, \beta_3 \dots \beta_r, \dots$ einer absolut convergenten Reihe, indem dann gewiß eine GröÙe β so bestimmbar ist, daß

$$\sum_{r=2}^{\infty} \nu \beta_r \beta^{r-1} (1 + \varepsilon)^{r-1} < \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}$$

wird. Die Reihe $\mathfrak{P}(Z - \alpha_0)$ convergirt dann sicher in dem Bereiche, wo

$$\left| \frac{Z - \alpha_0}{\alpha_1} \right| < \beta (1 + \varepsilon)$$

ist.

Die Coefficienten b_2, b_3, \dots werden aber zweifellos die gestellte Bedingung erfüllen, weil $|Z|$ für alle Werthe $|z| = r < R$ ein Maximum g hat und

$$|\alpha_{\mu}| \leq g r^{\mu}.$$

Damit, daß eine Reihe $\mathfrak{P}(Z - \alpha_0)$ existirt, ist noch nicht gesagt, daß die gegebene Reihe an einer Stelle z' ihres Convergencebereiches verschwindet, denn die Stelle $Z = 0$ braucht nicht in dem Convergencekreise der Reihe für z zu liegen. Es kann somit auch ganze transcendente Functionen geben, die für keinen endlichen Werth der Variablen verschwinden, und in der That haben wir eine solche in der Function $E(x)$ bereits kennen gelernt.

Gehen wir nun wieder auf das durch eine Gleichung

$$G(y, x_1, x_2, \dots x_n) = 0$$

definirte algebraische Gebilde mit der Stelle $(b_{\mu}, a_1, a_2, \dots a_n)$ zurück und setzen fest, daß in

$$G(b_{\mu} + \eta_{\mu}, a_1 + \xi_1, \dots a_n + \xi_n) = \sum_{\mu=0}^m \varphi_{\mu}(\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n) \eta_{\mu}^{m-\mu} = 0$$

$\varphi_{m-1}(0, 0, \dots 0)$ von Null verschieden sei, so läßt sich in der Umgebung der Stelle $\xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_m = 0$ ein Bereich angeben, wo

die Quotienten $-\frac{\varphi_\mu}{\varphi_{\mu-1}}$ durch convergente Potenzreihen

$$\overline{\mathfrak{P}}_{m-\mu}(\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n)$$

darstellbar sind. Dann werden aber die Coefficienten des Ausdruckes:

$$\eta_\mu = \overline{\mathfrak{P}}_0(\xi_1, \xi_2, \dots \xi_n) + \overline{\mathfrak{P}}_2(\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n) \eta_\mu^2 + \dots + \overline{\mathfrak{P}}_m(\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n) \eta_\mu^m$$

in einem hinlänglich kleinem Bereiche um die Stelle $(\xi) = 0$ auch die Bedingungen erfüllen, welche für eine convergente Entwicklung

$$\eta_\mu = \mathfrak{P}_\mu(\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n)$$

nothwendig sind. $\mathfrak{P}_\mu(0, 0, \dots 0)$ ist wieder gleich $\overline{\mathfrak{P}}_0(0, 0 \dots 0)$, d. i. Null.

Ist endlich unter

$$G(y, x_1, x_2, \dots x_n)$$

eine in der Umgebung R einer Stelle $(b, a_1, a_2, \dots a_n)$ convergente Potenzreihe verstanden, die an dieser Stelle verschwindet und hat der Coefficient von $y - b$ nicht die Nullstelle (a) , so geht aus der Gleichung $G = 0$ wieder eine zweite der Form

$$\eta - \mathfrak{P}_0(\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n) - \mathfrak{P}_2(\xi_1, \xi_2, \dots \xi_n) \eta^2 - \mathfrak{P}_3(\xi_1, \xi_2, \dots \xi_n) \eta^3 - \dots = 0$$

hervor, wo die Potenzreihen \mathfrak{P} einen gemeinsamen Convergenzradius r besitzen und η die Werthe annehmen kann, deren Betrag kleiner ist als R .

Offenbar gibt es auch hier eine die letzte Gleichung identisch erfüllende Potenzreihe:

$$\eta = \mathfrak{P}(\xi_1, \xi_2, \dots \xi_n).$$

§ 38. Darstellung des algebraischen Gebildes.

Wissen wir einmal, daß eine Gleichung

$$G(y, x_1, x_2, \dots x_n) = 0$$

in der Umgebung einer regulären d. h. endlichen und einfachen Stelle $(b_\mu, a_1, a_2, \dots a_n)$ durch eine bestimmte Potenzreihe

$$y - b_\mu = \mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a))$$

identisch zu erfüllen ist, so können wir zur Ermittlung derselben die Methode der unbestimmten Coefficienten verwenden, d. h. wir substituieren in der gegebenen Gleichung eine Potenzreihe

$$y = b_\mu + \sum_{(\mu_r)=0}^{\infty} c_{\mu, \mu_2, \dots \mu_n} (x_1 - a_1)^{\mu_1} (x_2 - a_2)^{\mu_2} \dots (x_n - a_n)^{\mu_n}$$

und bestimmen die Coefficienten derart, daß die Gleichung identisch besteht.

Ist z. B. die Gleichung

$$y^2 - (1+x)^n = 0$$

vorgelegt, in welcher n eine positive oder negative ganze Zahl bedeutet, und beachten wir, daß $(x=0, y=1)$ eine Stelle des algebraischen Gebildes ist, schreiben die Gleichung in der oben gebrauchten Form:

$$(2(y-1) - nx) + ((y-1)^2 - \frac{n(n-1)}{2} x^2) - \frac{n(n-1)(n-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} x^3 - \dots - x^n = 0$$

und setzen

$$y - 1 = x\mathfrak{P}(x) = x \sum_{\nu=0}^{\infty} c_{\nu} x^{\nu},$$

$$(y-1)^2 = x^2 \sum_{\nu=0}^{\infty} (c_0 c_{\nu} + c_1 c_{\nu-1} + c_2 c_{\nu-2} + \dots + c_{\nu} c_0) x^{\nu}$$

in der letzten Gleichung ein, so gibt eine einfache Rechnung für den Coefficienten c_{ν} den Ausdruck:

$$\frac{\frac{n}{2} \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \cdots \left(\frac{n}{2} - \nu \right)}{1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot (\nu + 1)}.$$

Dieser Ausdruck ist aus $\frac{n}{2}$ gerade so zusammengesetzt, wie der $(\nu+1)^{\text{te}}$ Binominalcoefficient $\binom{n}{\nu+1}$ oder $(n)_{\nu+1}$ aus n , darum führen wir für c_{ν} die entsprechende Bezeichnung $\left(\frac{\frac{n}{2}}{\nu+1} \right)$ oder $\left(\frac{n}{2} \right)_{\nu+1}$ ein, und die Entwicklung der Größe y in einer Umgebung der Stelle $(x=0, y=1)$ lautet:

$$y = 1 + \left(\frac{n}{2} \right)_1 x + \left(\frac{n}{2} \right)_2 x^2 + \dots$$

In der Umgebung der Stelle $(x=0, y=-1)$ folgt

$$y = - \left(1 + \left(\frac{n}{2} \right)_1 x + \left(\frac{n}{2} \right)_2 x^2 + \dots \right).$$

Die gefundenen Reihen besagen, solange sie eine Giltigkeit haben, was man unter der zweiten Wurzel aus dem Ausdruck $(1+x)^n$ zu verstehen hat, und man schreibt:

$$y = \pm \sqrt{(1+x)^n} = \pm \left(1 + \left(\frac{n}{2} \right)_1 x + \left(\frac{n}{2} \right)_2 x^2 + \dots \right) = \pm (1+x)^{\frac{n}{2}}.$$

Die Potenzreihe $y = b + \mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n | (a))$ können wir noch auf Grund einer anderen Bemerkung aufstellen. Weil y in der Umgebung einer Stelle (a) , die weder Unendlichkeitsstelle eines Coefficienten der Gleichung:

$$y^m + \sum_{\mu=1}^m y^{m-\mu} f_{\mu}(x_1, x_2, \dots x_n) = 0,$$

noch Nullstelle der Discriminante $D(x_1, x_2, \dots x_n)$ ist, durch eine convergente Potenzreihe dargestellt wird, besitzt y an der Stelle (a) Ableitungen aller Ordnungen nach den Variablen x . Wenn wir diese Ableitungen aus der Gleichung $G(y, x_1, x_2, \dots x_n) = 0$ selbst ablesen können, dürfen wir dann

$$y - b_{\mu} = \mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (a)) = \\ = \sum_{(\mu_n)=0}^{\infty} \left(\frac{\partial^{\mu_1+\mu_2+\dots+\mu_n} y}{\partial x_1^{\mu_1} \partial x_2^{\mu_2} \dots \partial x_n^{\mu_n}} \right) \frac{(x_1 - a_1)^{\mu_1}}{\mu_1!} \frac{(x_2 - a_2)^{\mu_2}}{\mu_2!} \dots \frac{(x_n - a_n)^{\mu_n}}{\mu_n!}$$

setzen.

Was diese Ableitungen betrifft, so sind diese wirklich leicht zu finden. Ist zunächst $G(y, x) = 0$ die vorgegebene Gleichung, und denken wir hierin y durch die ihr genügende Potenzreihe $b + \mathfrak{P}(x|a)$ ersetzt, so ist die Differentialänderung der convergenten Potenzreihe $G(b + \mathfrak{P}(x|a), x)$

$$dG(y, x) = \frac{\partial G}{\partial x} dx + \frac{\partial G}{\partial y} dy$$

identisch Null und demnach

$$\frac{dy}{dx} = - \frac{\frac{\partial G}{\partial x}}{\frac{\partial G}{\partial y}}.$$

Aus den Gleichungen

$$d^2 G(y, x) = \\ = \left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} \right) dx^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 G}{\partial x \partial y} \right) dx dy + \left(\frac{\partial^2 G}{\partial y^2} \right) dy dy + \left(\frac{\partial^2 G}{\partial y} \right) d^2 y = 0,$$

$$d^3 G(y, x) = \\ = \frac{\partial^3 G}{\partial x^3} dx^3 + 3 \frac{\partial^3 G}{\partial x^2 \partial y} dx^2 dy + 3 \frac{\partial^3 G}{\partial y^2 \partial x} dx dy^2 + \frac{\partial^3 G}{\partial y^3} dy^3 \\ + 3 \frac{\partial^3 G}{\partial x \partial y} dx d^2 y + 3 \frac{\partial^3 G}{\partial y^2} dy d^2 y + \frac{\partial^3 G}{\partial y} d^3 y = 0,$$

usw. folgt dann:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = - \frac{\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 G}{\partial x \partial y} \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}{\frac{\partial G}{\partial y}}$$

$$\frac{d^3 y}{dx^3} = - \frac{1}{\frac{\partial G}{\partial y}} \cdot \left\{ \frac{\partial^3 G}{\partial x^3} + 3 \frac{\partial^3 G}{\partial x^2 \partial y} \left(\frac{dy}{dx} \right) + 3 \frac{\partial^3 G}{\partial x \partial y^2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 + \frac{\partial^3 G}{\partial y^3} \left(\frac{dy}{dx} \right)^3 \right. \\ \left. + 3 \left(\frac{\partial^3 G}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^3 G}{\partial y^2} \left(\frac{dy}{dx} \right) \right) \frac{d^2 y}{dx^2} \right\}.$$

Es ist ersichtlich, daß

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{dy}{dx} \right) = \frac{d}{dx} \left(- \frac{\frac{\partial G}{\partial x}}{\frac{\partial G}{\partial y}} \right) \text{ und } \frac{d^3 y}{dx^3} = \frac{d}{dx} \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right) \text{ ist usw.}$$

Ist die gegebene Gleichung $G(y, x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$, so wird

$$\begin{aligned} dG &= \frac{\partial G}{\partial y} dy + \sum_{v=1}^n \frac{\partial G}{\partial x_v} dx_v = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial x_v} = - \frac{\frac{\partial G}{\partial x_v}}{\frac{\partial G}{\partial y}}, \\ d^2 G &= \sum_{\mu, v} \frac{\partial^2 G}{\partial x_\mu \partial x_v} dx_\mu dx_v + 2 \sum_{v=1}^n \frac{\partial^2 G}{\partial x_v \partial y} dx_v dy \\ &\quad + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} dy^2 + \frac{\partial G}{\partial y} dy^2 = 0 \quad \text{usw.} \end{aligned}$$

Wendet man diese Methode zur Bestimmung der um die Stelle $(x=0, y=1)$ des Gebildes

$$y^m - (1+x)^n = 0$$

giltigen Entwicklung für y an, so geht die Potenzreihe

$$y = 1 + \frac{n}{m} x + \frac{n}{m} \left(\frac{n}{m} - 1 \right) \frac{x^2}{1 \cdot 2} + \frac{n}{m} \left(\frac{n}{m} - 1 \right) \left(\frac{n}{m} - 2 \right) \frac{x^3}{3!} + \dots$$

hervor und weil der Coefficient von x^v

$$\frac{n}{m} \left(\frac{n}{m} - 1 \right) \left(\frac{n}{m} - 2 \right) \dots \left(\frac{n}{m} - v + 1 \right) \\ 1 \cdot 2 \cdot 3 \dots v$$

wieder die Form des v^{ten} Binomialcoefficienten einer ganzen Zahl $\frac{n}{m}$ hat, schreiben wir auch in dem Falle der gebrochenen Zahl $\frac{n}{m}$:

$$y = \sqrt[m]{(1+x)^n} = (1+x)^{\frac{n}{m}} = 1 + \left(\frac{n}{m} \right)_1 x + \left(\frac{n}{m} \right)_2 x^2 + \left(\frac{n}{m} \right)_3 x^3 + \dots$$

Sind $\varepsilon = 1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \dots \varepsilon_m$ die m Wurzeln der Gleichung $\varepsilon^m = 1$, so sind die $x=0$ zugehörigen y -Werthe ε_μ ($\mu = 1, 2 \dots m$), und die Darstellung der m -deutigen GröÙe y in der Umgebung der Stelle $(x=0, y=\varepsilon_\mu)$ lautet:

$$y = \varepsilon_\mu \left(1 + \left(\frac{n}{m} \right)_1 x + \left(\frac{n}{m} \right)_2 x^2 + \dots \right) = \varepsilon_\mu \sum_{v=0}^{\infty} \left(\frac{n}{m} \right)_v x^v,$$

wo nun auch die Bezeichnung $\left(\frac{n}{m} \right)_0 = 1$ benutzt ist.

Bildet man die m^{te} Wurzel der n_1^{ten} und n_2^{ten} Potenz von $(1+x)$ in der Umgebung derselben Stelle $(x=0, y=1)$, so läßt sich durch Multiplication oder Division der diese Wurzeln darstellenden Potenzreihen leicht der Satz beweisen:

$$(1+x)^{\frac{n_1}{m}} (1+x)^{\frac{n_2}{m}} = (1+x)^{\frac{n_1+n_2}{m}},$$

respective

$$\frac{(1+x)^{\frac{n_1}{m}}}{(1+x)^{\frac{n_2}{m}}} = (1+x)^{\frac{n_1-n_2}{m}},$$

d. h. für die gebrochenen Potenzen gelten dieselben formalen Rechnungsgesetze wie für die ganzzahligen Potenzen. Wenn diese Beziehungen zunächst in einem Bereiche um die Stelle $x=0$ (welcher der Werth 1 zugeordnet ist) erkannt sind, gelten sie auch für die aus den primitiven Elementen auf gleichem Wege abgeleiteten Fortsetzungen, die schließlich den ganzen Stetigkeitsbereich der m -deutigen Potenzen umfassen.

Wir werden später die allgemeine Potenz zu untersuchen haben; hier sollte nur darauf aufmerksam gemacht werden, daß wir die Potenzen mit rationalen Exponenten bereits behandeln können und wir stehen nicht an, ihre Regeln schon hier zu verwenden. Es mag nur noch bemerkt werden, was für eine Eigenthümlichkeit das algebraische Gebilde aufweist, wenn in

$$y^m - (a+x)^n = 0 \quad \text{oder} \quad y^m - a^n \left(1 + \frac{x}{a}\right)^n = 0$$

die ganzen Zahlen m und n einen gemeinsamen Theiler k besitzen.

Es sei $m = m_1 k$ und $n = n_1 k$, dann wird die Entwicklung in der Umgebung von $x=0$, $y = \sqrt[m]{a^n} = A = \sqrt[n_1]{a^{n_1}}$:

$$y = A \left(1 + \binom{m_1}{n_1}_1 \left(\frac{x}{a}\right) + \binom{m_1}{n_1}_2 \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \dots \right) = A \left(1 + \frac{x}{a} \right)^{\frac{n_1}{m_1}},$$

sie stimmt also dort vollständig mit der aus der Gleichung

$$y^{m_1} - A^{m_1} \left(1 + \frac{x}{a} \right)^{n_1} = 0$$

entspringenden Entwicklung überein, und jede Fortsetzung dieser letzteren genügt auch der ersten Gleichung, die reductibel sein muß.

Wenn man also y als die $\left(\frac{n}{m}\right)^{\text{te}}$ Potenz auffaßt, ist y nur m_1 -deutig. —

Gehören zu einer endlichen Stelle $x=a$ zufolge der algebraischen Gleichung

$$G(y, x) = f_0(x)y^m + f_1(x)y^{m-1} + \dots + f_m(x) = 0$$

m endliche und von einander verschiedene Werthe $y = b_1, b_2, \dots, b_m$ und sind die Umgebungen der m Stellen ($x=a$, $y=b_\mu$) durch

$$y = b_\mu + (x-a) \mathfrak{P}_\mu(x-a) = \mathfrak{P}^{(\mu)}(x|a)$$

dargestellt, so folgt leicht, daß der Convergenzradius keines der aufgestellten Elemente $\mathfrak{P}^{(\mu)}(x|a)$ kleiner sein kann als $|c-a|$, wenn c die der Stelle a nächstliegende Nullstelle der Function $f_0(x)$ oder der Discriminante $D(x)$ bedeutet. Denn andernfalls könnte man in der

Umgebung jeder Stelle x_0 , welche auf der Begrenzung des kleinsten der Convergenzkreise unserer Elemente liegt, m Potenzreihen

$$y = \bar{\mathfrak{P}}^{(\mu)}(x|x_0)$$

aufstellen, weil daselbst die für eine solche Entwicklung nothwendigen Bedingungen erfüllt sind. Allen Stellen x_1 , welche dem gemeinsamen Convergenzbereiche dieser und der ursprünglichen Elemente angehören, lassen sich dann $2m$ Reihen

$$\mathfrak{P}^{(\mu)}x|a, x_1) \quad \text{und} \quad \bar{\mathfrak{P}}^{(\mu)}(x|x_0, x_1)$$

zuordnen, die aber paarweise übereinstimmen müssen, weil es nur m Reihen geben kann, welche einem Werthe x_1 m der Gleichung $G(y, x) = 0$ genügende y -Werthe zuweisen. Dann aber kann x_0 keine singuläre Stelle eines der gegebenen Elemente $\mathfrak{P}^{(\mu)}(x|a)$ sein, und man sieht, daß in der Umgebung der nächsten Grenzstelle nicht m sondern weniger Potenzreihen existiren können, und dieselbe als Nullstelle von f_0 oder D zu definiren ist.

Bei der allgemeinen binomischen Gleichung

$$y^m f_0(x) + f_m(x) = 0$$

sind die Nullstellen der ganzen Functionen $f_0(x)$ und $f_m(x)$ die im Endlichen gelegenen singulären Stellen der allenthalben aufzustellenden Elemente für y . Sind die Coefficienten f_0, f_1, \dots, f_m ganze transcendente Functionen, so können diese in einem endlichen Bereiche nicht unendlich viele Nullstellen besitzen, sonst müßten sie ja in der Umgebung einer Häufungsstelle für unendlich viele Werthe Null und dann identisch Null sein. Darum aber läßt sich für Gleichungen $G(x, y) = 0$, deren Coefficienten ganze transcendente Functionen sind, der Satz über den gemeinsamen Convergenzbereich m simultaner Elemente um eine Stelle a ebenso aussprechen wie früher; er enthält alle Stellen, die a näher liegen als die nächste Nullstelle von $f_0(x)$ oder $D(x)$.

Andere Vorkommnisse wird man später leicht beurtheilen, wenn die Darstellung eindeutiger Functionen mit beliebigen singulären Stellen bekannt ist. —

Enthält die gegebene Gleichung mehrere unabhängige Variable x_1, x_2, \dots, x_n und ist (a) eine Stelle, in deren Umgebung m Elemente

$$y = \mathfrak{P}^{(\mu)}(x_1, x_2, \dots, x_n|(a))$$

existiren, so kann eine Stelle $(x^{(0)})$ nur dann auf dem wahren gemeinsamen Convergenzbereiche dieser Reihen liegen, wenn es unter den den Bedingungen

$$|x_r - a_r| = |x_r^{(0)} - a_r|$$

gehorchenden Stellen (x) mindestens eine gibt, die zu jenen singulären gehört, welche bei Entwicklung der Elemente ausgeschlossen werden mußten.

Die simultanen Fortsetzungen simultaner Elemente werden nach einem früheren Satze dieselbe Gleichung erfüllen wie diese und in ihrem gemeinsamen Convergenzbereiche geben sie alle Werthe y , deren diese GröÙe daselbst fähig ist, d. h. es gibt in dem Convergenzbereiche von m Reihen

$$y = \mathfrak{B}^{(\mu)}(x_1, x_2, \dots x_n | (a)).$$

keine Stelle (x') , der zufolge der Gleichung

$$G(y, x_1, x_2, \dots x_n) = f_n + y f_{n-1} + y^2 f_{n-2} + \dots + f_0 y^n = 0$$

andere Werthe für y zugehören, als diejenigen, welche eben die Reihen liefern.

Gäbe es neben den aus den Reihen entspringenden Werthen $y_1', y_2', \dots y_m'$ noch einen zu der Stelle (x') gehörigen Werth y' , und setzt man

$$x_\nu = x'_\nu + \xi'_\nu, \quad y = y'_\mu + \eta'_\mu, \quad y = y'_\mu + \eta',$$

so entstehen die $(m+1)$ Gleichungen

$$\varphi_m(\xi'_1, \xi'_2, \dots \xi'_n) + \eta'_\mu \varphi_{m-1}(\xi'_1, \xi'_2, \dots \xi'_n) + \dots + \eta'^m_\mu \varphi_0(\xi'_1, \xi'_2, \dots \xi'_n) = 0 \quad (\mu = 1, 2, \dots m),$$

$$\varphi_m(\xi'_1, \xi'_2, \dots \xi'_n) + \eta' \varphi_{m-1}(\xi'_1, \xi'_2, \dots \xi'_n) + \dots + \eta'^m \varphi_0(\xi'_1, \xi'_2, \dots \xi'_n) = 0.$$

Die Subtraction ergibt:

$$(\eta'_\mu - \eta') \varphi_{m-1} + (\eta'^2_\mu - \eta'^2) \varphi_{m-2} + \dots + (\eta'^m_\mu - \eta'^m) \varphi_0 = 0,$$

und weil man bei ungleichem η'_μ und η' durch $\eta'_\mu - \eta'$ dividiren kann, folgt auch

$$\varphi_{m-1} + (\eta'_\mu + \eta') \varphi_{m-2} + \dots + (\eta'^{m-1}_\mu + \eta'^{m-2}_\mu \eta' + \dots + \eta'^{m-1}) \varphi_0 = 0.$$

Doch diese Gleichung kann nicht bestehen, indem die Coefficienten von $(\eta'_\mu + \eta')$, $(\eta'^2_\mu + \eta'_\mu \eta' + \eta'^2)$ usw. mit $\xi'_1, \xi'_2, \dots \xi'_n$ beliebig klein werden und $\varphi_{m-1}(0, 0 \dots 0)$ von Null verschieden ist, weil ja in einer Umgebung von (x') m Reihen aufzustellen sind. Die Annahme war also unrichtig und der Satz erscheint bewiesen. —

Jetzt ist auch die in dem zweiten Capitel angeregte Frage nach der Continuität einer ganzen rationalen Function $f(s)$ dahin zu beantworten: Weil die ganze Function jeden Werth annimmt und die einem ersten für $s = a$ hervorgehenden Werthe A benachbarten Functionswerthe für solche Argumente s entspringen, die nur durch eine Potenzreihe gegeben werden, so ist die ganze rationale Function continuirlich.

§ 39. Fortsetzung.

Wir setzen nunmehr voraus, daß die algebraische Gleichung (mit rationalen Coefficienten) $G(y, x) = 0$ in der Umgebung einer Stelle (b, a) nicht die vollständige Form

$$\left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)\eta + \left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)\xi + (\eta, \xi)_2 + (\eta, \xi)_3 + \dots = 0$$

besitze, sondern dafs hierin

$$\frac{\partial G}{\partial x}, \frac{\partial^2 G}{\partial x^2}, \dots, \frac{\partial^{\mu-1} G}{\partial x^{\mu-1}}$$

an der Stelle $(x = a, y = b)$ verschwinden. Ist immer noch $\left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)$ von Null verschieden, so werden die oben aufgestellten Differentialquotienten

$$\frac{dy}{dx}, \frac{d^2 y}{dx^2}, \dots, \frac{d^{\mu-1} y}{dx^{\mu-1}}$$

an der Stelle $(x = a, y = b)$ Null sein, und die oben benutzte Entwicklungsform

$$y - b = \sum_{v=1}^{\infty} \left(\frac{d^v y}{dx^v}\right) \cdot \frac{(x-a)^v}{v!}$$

erhält die Gestalt

$$y = b + (x - a)^\mu \mathfrak{P}_1(x|a). \quad -$$

Ist $y = \beta$ keine Nullstelle der Discriminante der Gleichung $G(y, x) = 0$ mit der unabhängigen Variablen y und keine Nullstelle des Coefficienten von x^μ in der nach x geordneten Gleichung (mit ganzen Functionen von y als Coefficienten), so können wir in der Umgebung einer Stelle $(y = \beta, x = \alpha)$ eine Potenzreihe

$$x = \alpha + (y - \beta)^2 \mathfrak{P}_2(y|\beta)$$

ableiten, sofern $\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)_{\alpha, \beta}$ von Null verschieden ist.

Jenachdem wir also x oder y als unabhängige Variable ansehen, folgt in der Umgebung einer nicht singulären Stelle (a, b) resp. (b, α) eine Entwicklung der Gestalt

$$x - a = t, \quad y - b = t^\mu \mathfrak{P}_1(t)$$

oder

$$y - b = t, \quad x - a = t^2 \mathfrak{P}_2(t),$$

wo t eine neue Variable bedeutet.

Substituiert man an Stelle der Variablen t eine in der Umgebung der Stelle $u = 0$ verschwindende convergente Potenzreihe

$$t = \alpha_1 u + \alpha_2 u^2 + \dots,$$

so besteht in der Umgebung jeder endlichen Stelle (a, b) , an welcher $\frac{\partial G}{\partial x}, \frac{\partial G}{\partial y}$ nicht gleichzeitig Null sind, eine Darstellung des algebraischen Gebildes in der Form:

$$x = a + u \mathfrak{P}_1(u), \quad y = b + u \mathfrak{P}_2(u),$$

wo $\mathfrak{P}_1(u)$ und $\mathfrak{P}_2(u)$ gewöhnliche Potenzreihen sind. — Beschränkt man die neue unabhängige Variable u auf den Bereich, wo \mathfrak{P}_1 und \mathfrak{P}_2 convergiren, so gehört zu jeder Stelle u ein Werth t und ein Werthe-

paar (x, y) , und verschiedenen Werthen u_1, u_2 entsprechen verschiedene Werthepaare, wenn nur $|\alpha_1|$ von Null verschieden ist, denn dann werden u_1 und u_2 verschiedene Werthe t_1 und t_2 zuzuordnen sein. Wäre nämlich $t_1 = t_2$, so müßte in

$$t_1 - t_2 = (u_1 - u_2) (\alpha_1 + \alpha_2(u_1 + u_2) + \alpha_3(u_1^2 + u_1 u_2 + u_2^2) + \dots)$$

der absolute Betrag von

$$\alpha_1 + \alpha_2(u_1 + u_2) + \dots$$

verschwinden, und das geht bei der über $|\alpha_1|$ gemachten Annahme nicht an.

Setzt man an Stelle von u eine neue Potenzreihe mit der unabhängigen Variablen v : $u = \mathfrak{P}(v)$, nimmt an, daß $\mathfrak{P}(0)$ verschwindet und der Coefficient von v von Null verschieden ist, auf daß

$$u = \beta_1 v + \beta_2 v^2 + \dots$$

gilt, so folgt eine neue Darstellung:

$$x = a + \overline{\mathfrak{P}}_1(v), \quad y = b + \overline{\mathfrak{P}}_2(v).$$

Jedem Werthe v aus dem Convergencebereiche der Reihen $\overline{\mathfrak{P}}_1$ und $\overline{\mathfrak{P}}_2$ gehört ein Werthepaar (x, y) und verschiedenen Werthen v_1 und v_2 gehören verschiedene Werthepaare (x, y) an, denn bei der gemachten Voraussetzung können die entsprechenden u -Werthe nicht gleich sein.

Auf die genannte Art läßt sich demnach ein Element des algebraischen Gebildes durch unendlich viele Paare von Potenzreihen darstellen; es ist nur zu zeigen, daß die einem *Functionenpaare*

$$x = a + u \mathfrak{P}_1(u), \quad y = b + u \mathfrak{P}_2(u)$$

entspringenden Werthepaare (x, y) einer hinlänglich kleinen Umgebung von $u = 0$ identisch sind mit den aus einem zweiten Functionenpaare

$$x = a + v \overline{\mathfrak{P}}_1(v), \quad y = b + v \overline{\mathfrak{P}}_2(v)$$

hervorgehenden Werthen für x und y , wenn man v wieder in hinlänglich kleinem Bereiche um die Stelle $v = 0$ erhält.

Setzt man

$$x - a = a_0 u^\mu + a_1 u^{\mu+1} + \dots, \quad y - b = b_0 u^\nu + b_1 u^{\nu+1} + \dots$$

und leitet einen der μ Werthe von $\sqrt[\mu]{\frac{x-a}{a_0}}$ — er heiße X_μ — durch die Entwicklung von

$$\sqrt[\mu]{u^\mu \left(1 + \frac{a_1}{a_0} u + \frac{a_2}{a_0} u^2 + \dots \right)}$$

oder

$$u \sqrt[\mu]{1 + \left\{ \frac{a_1}{a_0} u + \frac{a_2}{a_0} u^2 + \dots \right\}}$$

ab, bestimmt hierauf die der Reihe

$$X_\mu = u + a_2' u^2 + a_3' u^3 + \dots \quad (\alpha)$$

identisch genügende Reihe

$$u = \mathfrak{P}_1^{(1)}(X_\mu) = \mathfrak{P}_1^{(1)}\left(\left(\frac{x-a}{a_0}\right)^{\frac{1}{\mu}}\right) \quad (\beta)$$

oder kehrt — wie man sagt — die Reihe (α) um, so wird die Reihe (β) die Gleichung $x - a = u \mathfrak{P}_1(u)$ identisch erfüllen. Durch Substitution der μ Reihen (β) in die Gleichung $y - b = u \mathfrak{P}_2(u)$ ordnet man andererseits den μ Werthen von $\sqrt[\mu]{\frac{x-a}{a_0}}$ μ Werthe y zu, denn in

$$b_0 \left(\mathfrak{P}_1^{(1)} \left(\left(\frac{x-a_1}{a_0} \right)^{\frac{1}{\mu}} \right) \right)^r + b_1 \left(\mathfrak{P}_1^{(1)} \left(\left(\frac{x-a_1}{a_0} \right)^{\frac{1}{\mu}} \right) \right)^{r+1} + \dots$$

können nicht alle Potenzen von $\left(\frac{x-a_1}{a_0}\right)^{\frac{1}{\mu}}$; die mit μ keinen Theiler gemein haben, verschwinden, denn sonst würden verschiedenen u -Werthen gleiche Werthepaare (x, y) entsprechen können. Man sieht also, daß einem Werthe von x in der Nähe von a μ der Stelle b benachbarte Werthe y zugehören, und ebenso gehören einem Werthe y ν der Stelle a benachbarte Werthe x zu.

Ist andererseits

$$x - a = A_0 v^{\mu'} + A_1 v^{\mu'+1} + \dots, \quad y - b = B_0 v^{\nu'} + B_1 v^{\nu'+1} + \dots,$$

so entsprechen einem Werthe x in der Reihe von a μ' Werthe y und einem Werthe y ν' Werthe von x . Das ist nicht anders möglich als wenn

$$\mu = \mu', \quad \nu = \nu'$$

ist, da einem x - oder y -Werthe nur eine bestimmte Anzahl von y - oder x -Werthen zugehören kann. Ferner lehrt ein ähnlicher Schluß wie früher, daß die Werthepaare (x, y) aus den beiden Functionenpaaren gleich sein müssen, d. h. solange u und v zufolge der Beziehung

$$u = \beta_1 v + \beta_2 v^2 + \dots$$

um beliebig wenig von einander abweichen, können die zugehörigen Werthe x_1 und x_2 nicht verschieden ausfallen.

Umgekehrt sieht man, daß die zweien Functionenpaaren entsprechenden unendlich kleinen Werthe für $(x-a)$ und $(y-b)$ nur übereinstimmen können, wenn u und v durch eine Gleichung

$$u = \beta_1 v + \beta_2 v^2 + \dots \quad (|\beta_1| > 0)$$

oder

$$v = \beta_1' u + \beta_2' u^2 + \dots \quad (|\beta_1'| > 0)$$

verbunden sind. —

Wir haben nun gelernt, wie man das algebraische Gebilde an jenen endlichen Stellen darstellt, wo die Discriminante $D_1(x)$ oder $D_2(y)$ verschwindet, jenachdem man x oder y als die unabhängige Variable betrachtet, doch war vorausgesetzt, daß an diesen Verzweigungsstellen

von $y(x)$ oder $x(y)$ $\left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)$ respective $\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)$ nicht verschwindet. Dann konnte y oder x nach gebrochenen Potenzen von $(x-a)$ oder $(y-b)$ entwickelt werden oder es existirte ein Functionenpaar

$$x-a = \mathfrak{P}_1(u), \quad y-b = \mathfrak{P}_2(u),$$

wo die Potenzreihen \mathfrak{P}_1 und \mathfrak{P}_2 nicht beide mit Gliedern ersten Grades beginnen.

Wir setzen nun auch voraus, daß die ganze Function $G(x, y)$ in der Umgebung einer im Endlichen gelegenen Nullstelle (a, b) die Form besitze:

$$G(a+\xi, b+\eta) = (\xi, \eta)_\mu + (\xi, \eta)_{\mu+1} + \dots + (\xi, \eta)_m + \dots,$$

wo $(\xi, \eta)_\nu$ wieder die Gesamtheit der Glieder ν^{ter} Dimension bezeichnet. Es sollen also die beiden Größen

$$\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right) \quad \text{und} \quad \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)$$

verschwinden und die Glieder niedrigster Dimension, welche nicht Null sind, seien Glieder μ^{ter} Dimension. Wir können voraussetzen, daß die Coefficienten von ξ^μ und η^μ , d. i.

$$\left(\frac{\partial^\mu G}{\partial x^\mu}\right) \quad \text{und} \quad \left(\frac{\partial^\mu G}{\partial y^\mu}\right)$$

nicht Null sind, denn andernfalls führt eine homogene lineare Substitution

$$\xi = a_{11}\xi' + a_{12}\eta', \quad \eta = a_{21}\xi' + a_{22}\eta'$$

auf eine Darstellung von $G(a+\xi', b+\eta')$, in welcher die Coefficienten von ξ'^μ und η'^μ nicht verschwinden. In der That folgt ja aus der Existenz eines Gliedes μ^{ter} Dimension

$$\left(\frac{\partial^\mu G}{\partial x^{\mu-\nu} \partial y^\nu}\right) \frac{\xi^{\mu-\nu} \eta^\nu}{(\mu-\nu)! \nu!} = \left(\frac{\partial^\mu G}{\partial x^{\mu-\nu} \partial y^\nu}\right) \frac{(a_{11}\xi' + a_{12}\eta')^{\mu-\nu} (a_{21}\xi' + a_{22}\eta')^\nu}{(\mu-\nu)! \nu!}$$

das Vorhandensein nicht verschwindender Coefficienten von ξ'^μ und η'^ν .

Zerlegt man die homogene Function μ^{ten} Grades $(\xi, \eta)_\mu$ in das Product ihrer Primfactoren:

$$(\xi, \eta)_\mu = C(\beta_1\xi - \alpha_1\eta)^{\mu_1}(\beta_2\xi - \alpha_2\eta)^{\mu_2} \dots (\beta_r\xi - \alpha_r\eta)^{\mu_r},$$

indem man zunächst $\frac{\xi}{\eta} = \xi$ setzt, dann

$$(\xi, \eta)_\mu = \eta^\mu (\xi)_\mu = \eta^\mu c \prod_{q=1}^r (\xi - \xi_q)^{\mu_q}$$

bildet und endlich

$$\xi_q = \frac{\alpha_q}{\beta_q}, \quad C = c\beta_1^{-\mu_1}\beta_2^{-\mu_2} \dots \beta_r^{-\mu_r}$$

substituirt, und wählt man nach der Zerlegung entsprechend den r Größenpaaren α_q, β_q r Größenpaare a_q, b_q derart, daß

$$a_q \beta_q - b_q \alpha_q = 1 \quad \text{und} \quad |a_q \beta_{q'} - b_q \alpha_{q'}| > 0$$

wird, so kann man r mal zwei Gröfsen $\bar{\xi}_q$ und $\bar{\eta}_q$ durch die Gleichungen

$$\xi = (-\alpha_q + a_q \bar{\eta}_q) \bar{\xi}_q, \quad \eta = (-\beta_q + b_q \bar{\eta}_q) \bar{\xi}_q$$

definiren, aus denen

$$\bar{\xi}_q = b_q \xi - a_q \eta, \quad \bar{\eta}_q = \frac{\beta_q \xi - \alpha_q \eta}{b_q \xi - a_q \eta}$$

resultirt. In den neuen Gröfsen $\bar{\xi}_q, \bar{\eta}_q$ erhält die Function $(\xi, \eta)_\mu$ die Gestalt:

$$(\xi, \eta)_\mu = \bar{\xi}_q^\mu \bar{\eta}_q^{\mu_q} C \prod_{q'=1}^r (\beta_{q'} \alpha_{q'} - \alpha_{q'} \beta_{q'} - \bar{\eta}_{q'} (b_{q'} \alpha_{q'} - a_{q'} \beta_{q'}))^{\mu_{q'}}$$

und es wird

$$G(a + \xi, b + \eta) = \bar{\xi}_q^\mu \{ \bar{\eta}_q^{\mu_q} \psi_1(\bar{\eta}_q) + \bar{\xi}_q \psi_2(\bar{\eta}_q) + \dots \} = \bar{\xi}_q^\mu g_q(\bar{\xi}_q, \bar{\eta}_q),$$

wo g_q eine ganze Function von $\bar{\xi}_q$ und $\bar{\eta}_q$ bezeichnet.*)

Wir behaupten nun, daß die Gesammtheit der aus den r Gleichungen

$$g_q(\bar{\xi}_q, \bar{\eta}_q) = 0 \quad (q = 1, 2, \dots, r)$$

entstandenen unendlich kleinen Werthepaare $(\bar{\xi}_q, \bar{\eta}_q)$ mit Hilfe der diese Gröfsen definirenden Gleichungen gerade in die der ursprünglichen Gleichung $G(a + \xi, b + \eta) = 0$ genügenden unendlich kleinen Werthepaare zu transformiren sind, oder mit anderen Worten: daß die letzten r Gleichungen in der Umgebung der Stelle $(0, 0)$ der Gleichung $G(a + \xi, b + \eta) = 0$ äquivalent sind.

Da $g_q(\bar{\xi}_q, \bar{\eta}_q)$ keine von $\bar{\xi}_q$ freien Glieder in $\bar{\eta}_q$ enthält, die von niedrigerem als dem μ_q^{ten} Grade sind, entsprechen einem unendlich kleinem Werthe von $\bar{\xi}_q$, μ_q unendlich kleine Werthe $\bar{\eta}_q$, die wegen der Irreductibilität von g_q im Allgemeinen von einander verschieden ausfallen. Daher gehören zu unendlich kleinen Werthen $\bar{\xi}_1, \bar{\xi}_2, \dots, \bar{\xi}_r$

*) Man kann andrerseits die Gröfsen a_q und b_q so wählen, daß $a_q - \xi_q b_q$ für ein von q verschiedenes q' von Null verschieden und $a_q - \xi_q b_q = 1$ wird, und dann setze man

$$\xi = (-\xi_q + a_q \bar{\eta}_q) \bar{\xi}_q, \quad \eta = (-1 + b_q \bar{\eta}_q) \bar{\xi}_q$$

oder

$$\bar{\xi}_q = b_q \xi - a_q \eta, \quad \bar{\eta}_q = \frac{\xi - \xi_q \eta}{b_q \xi - a_q \eta},$$

so folgt

$$(\xi, \eta)_\mu = \bar{\xi}_q^\mu \bar{\eta}_q^{\mu_q} C \prod_{q'=1}^r (\xi_{q'} - \xi_q - \bar{\eta}_{q'} (\xi_q b_{q'} - a_{q'}))^{\mu_{q'}}$$

und

$$G(a + \xi, b + \eta) = \bar{\xi}_q^\mu g_q(\bar{\xi}_q, \bar{\eta}_q),$$

wo g_q ebenso wie $G(x, y)$ irreductibel sein muß.

μ unendlich kleine Werthepaare $(\bar{\xi}_\varrho, \bar{\eta}_\varrho)$ ($\varrho = 1, 2, \dots, r$) und die verschiedenen Gleichungen

$$g_\varrho(\bar{\xi}_\varrho, \bar{\eta}_\varrho) = 0 \quad g_{\varrho'}(\bar{\xi}_{\varrho'}, \bar{\eta}_{\varrho'}) = 0$$

entnommenen Werthepaare geben von einander verschiedene Lösungen

$$\xi_1 = (-\alpha_\varrho + \alpha_\varrho \bar{\eta}_\varrho) \bar{\xi}_\varrho, \quad \eta_1 = (-\beta_\varrho + \beta_\varrho \bar{\eta}_\varrho) \bar{\xi}_\varrho$$

$$\xi_2 = (-\alpha_{\varrho'} + \alpha_{\varrho'} \bar{\eta}_{\varrho'}) \bar{\xi}_{\varrho'}, \quad \eta_2 = (-\beta_{\varrho'} + \beta_{\varrho'} \bar{\eta}_{\varrho'}) \bar{\xi}_{\varrho'}$$

der Gleichung $G(a + \xi, b + \eta) = 0$. Setzt man nämlich voraus, daß bei gleichen Werthen von $\bar{\xi}_\varrho$ und $\bar{\xi}_{\varrho'}$

$$\xi_1 = \xi_2, \quad \eta_1 = \eta_2$$

wird, so müßte bei den hier in Betracht kommenden unendlich kleinen Werthen von $\bar{\eta}_\varrho$ und $\bar{\eta}_{\varrho'}$

$$\alpha_\varrho = \alpha_{\varrho'}, \quad \beta_\varrho = \beta_{\varrho'}$$

sein, was gegen die angenommene Zerlegung von $(\xi, \eta)_\mu$ verstößen würde. Es gehen also aus den r Gleichungen $g_\varrho = 0$ und den die Größen $\bar{\xi}_\varrho, \bar{\eta}_\varrho$ mit ξ und η verbindenden Gleichungen wirklich μ unendlich kleine Werthepaare ξ, η hervor, die der Gleichung

$$G(a + \xi, b + \eta) = 0$$

genügen. Weil aber diese Gleichung die Glieder ξ^μ und η^μ enthält, gehören umgekehrt zu einem Werthe ξ μ unendlich kleine Werthe η und μ_ϱ Werthepaare $\bar{\xi}_\varrho, \bar{\eta}_\varrho$. Jetzt ist die Äquivalenz des Systems von r Gleichungen $g_\varrho = 0$ mit der gegebenen Gleichung für unendlich kleine Werthepaare $(\bar{\xi}_\varrho, \bar{\eta}_\varrho)$ und (ξ, η) evident.

Um nun η als Function von ξ darzustellen, benütze man — sofern $\left(\frac{\partial g_\varrho}{\partial \bar{\eta}_\varrho}\right)$ an der Stelle $\bar{\eta}_\varrho = 0, \bar{\xi}_\varrho = 0$ nicht verschwindet — die aus den Gleichungen $g_\varrho(\bar{\xi}_\varrho, \bar{\eta}_\varrho) = 0$ hervorgehenden Potenzreihen:

$$\bar{\eta}_\varrho = \bar{\xi}_\varrho \mathfrak{P}_\varrho(\bar{\xi}_\varrho) \quad \text{oder} \quad \bar{\xi}_\varrho = t, \quad \bar{\eta}_\varrho = t \mathfrak{P}_\varrho(t).$$

Wenn demnach in der Zerlegung von $(\xi, \eta)_\mu$ μ von einander verschiedene Primfactoren $(\beta_\varrho \xi - \alpha_\varrho \eta)$ auftreten, gibt es in der Umgebung der Stelle $(x = a, y = b)$ des algebraischen Gebildes $G(x, y) = 0$ μ von einander verschiedene Functionenpaare:

$$\xi = \mathfrak{P}_1^{(\varrho)}(t), \quad \eta = \mathfrak{P}_2^{(\varrho)}(t)$$

oder

$$x - a = \mathfrak{P}_1^{(\varrho)}(t), \quad y - b = \mathfrak{P}_2^{(\varrho)}(t) \quad (\varrho = 1, 2, \dots, \mu)$$

und die Gesamtheit der aus denselben für hinlänglich kleine Werthe von t entspringenden Werthepaare (x, y) genügen der gegebenen Gleichung.

Die Stelle (a, b) heißt eine μ -elementige, weil μ der m Elemente für y an der Stelle $x = a$ denselben Werth b annehmen.

Gibt es hingegen ganze Functionen $g_q(\bar{\xi}_q, \bar{\eta}_q)$, in welchen das Glied niedrigsten Grades in $\bar{\eta}_q$ $\bar{\eta}_q^{\mu_q}$ ist, so verfähre man mit der Gleichung

$$g_q(\bar{\xi}_q, \bar{\eta}_q) = (\bar{\xi}_q, \bar{\eta}_q)_{\mu_q} + (\bar{\xi}_q, \bar{\eta}_q)_{\mu_q+1} + \dots = 0$$

ebenso wie früher mit $G(a + \xi, b + \eta) = 0$. Man zerlege die homogene ganze Function $(\bar{\xi}_q, \bar{\eta}_q)$, welche die Glieder $\bar{\xi}_q^{\mu_q}$ und $\bar{\eta}_q^{\mu_q}$ wieder enthalten soll, in das Product ihrer Primfactoren:

$$C_q \prod_{\pi=1}^p (\beta_{q,\pi} \bar{\xi}_q - \alpha_{q,\pi} \bar{\eta}_q)^{\mu_{q,\pi}},$$

wo $\sum_{\pi=1}^p \mu_{q,\pi} = \mu_q$ ist, wähle dann p Größenpaare $a_{q,\pi}, b_{q,\pi}$ derart, daß

$$a_{q,\pi} \beta_{q,\pi} - b_{q,\pi} \alpha_{q,\pi} = 1, \quad |a_{q,\pi} \beta_{q,\pi'} - b_{q,\pi} \alpha_{q,\pi'}| > 0$$

wird, setze wieder

$$\bar{\xi}_q = (-\alpha_{q,\pi} + a_{q,\pi} \bar{\eta}_{q,\pi}) \bar{\xi}_{q,\pi}, \quad \bar{\eta}_q = (-\beta_{q,\pi} + b_{q,\pi} \bar{\eta}_{q,\pi}) \bar{\xi}_{q,\pi},$$

leite dann

$$g_q(\bar{\xi}_q, \bar{\eta}_q) = (\bar{\xi}_{q,\pi})^{\mu_q} g_{q,\pi}(\bar{\xi}_{q,\pi}, \bar{\eta}_{q,\pi})$$

ab, so wird das System der p Gleichungen $g_{q,\pi} = 0$ mit den neuen Variablen $\bar{\xi}_{q,\pi}, \bar{\eta}_{q,\pi}$ der einen Gleichung $g_q = 0$ in dem früheren Sinne äquivalent sein und es kann der Fall eintreten, daß für $\bar{\eta}_{q,\pi}$ eine an der Stelle $\bar{\xi}_{q,\pi} = 0$ verschwindende Potenzreihe aufzustellen ist, die wieder die Existenz eines Functionenpaares

$$x - a = \mathfrak{P}_1^{(q,\pi)}(t), \quad y - b = \mathfrak{P}_2^{(q,\pi)}(t)$$

zur Folge hat.

Andernfalls muß man die Transformationen der bisherigen Art fortsetzen, doch ist zu zeigen, daß man nach einer endlichen Anzahl von Transformationen stets zu Gleichungen $g(\bar{\xi}, \bar{\eta}) = 0$ gelangt, welche die abhängige Variable $\bar{\eta}$ in der ersten Potenz enthalten.

Nehmen wir der Einfachheit halber an, daß

$$(\xi, \eta)_\mu = C(\beta_1 \xi - \alpha_1 \eta)^{\mu_1}$$

sei, und schreiben wir die aufeinanderfolgenden Substitutionen in der übersichtlichen Form:

$$\begin{aligned} \beta_1 a_1 - \alpha_1 b_1 &= 1, & \xi &= (-\alpha_1 + a_1 \eta_1) \xi_1, & \eta &= (-\beta_1 + b_1 \eta_1) \xi_1 \\ \beta_2 a_2 - \alpha_2 b_2 &= 1, & \xi_1 &= (-\alpha_2 + a_2 \eta_2) \xi_2, & \eta_1 &= (-\beta_2 + b_2 \eta_2) \xi_2 \\ & & & & & \dots \\ \beta_r a_r - \alpha_r b_r &= 1, & \xi_{r-1} &= (-\alpha_r + a_r \eta_r) \xi_r, & \eta_{r-1} &= (-\beta_r + b_r \eta_r) \xi_r, \end{aligned}$$

durch welche successive die Gleichungen

$$G(a + \xi, b + \eta) = \xi_1^{\mu_1} g_1(\xi_1, \eta_1)$$

$$g_1(\xi_1, \eta_1) = \xi_2^{\mu_2} g_2(\xi_2, \eta_2)$$

$$g_{r-1}(\xi_{r-1}, \eta_{r-1}) = \xi_r^{\mu_r} g_r(\xi_r, \eta_r)$$

hervorgehen, so muß man beweisen, daß die gewifs nicht zunehmenden Exponenten $\mu, \mu_1, \mu_2, \dots \mu_r$ nicht gleich bleiben können, sondern abnehmen und ein letzter den Werth Eins annehmen wird; dann enthält $g_r(\xi_r, \eta_r)$ gewifs ein Glied erster Dimension. Wenn aber in

$$g_r(\xi_r, \eta_r) = \gamma \xi_r + \delta \eta_r + (\xi_r, \eta_r)_2 + \dots$$

$\delta = 0$ sein sollte, führt eine lineare Substitution

$$\xi_r = \xi'_r + c\eta'_r, \quad \eta_r = \eta'_r$$

auf eine Gleichung:

$$g'_r(\xi'_r, \eta'_r) = \gamma \xi'_r + c\gamma \eta'_r + (\xi'_r, \eta'_r)_2 + \dots = 0,$$

der eine Potenzreihe:

$$\eta'_r = \xi'_r \mathfrak{P}(\xi'_r)$$

zu entnehmen ist. Weil ferner ξ und η rational durch ξ'_r und η'_r auszudrücken sind, existiren auch zwei Potenzreihen:

$$\xi = \mathfrak{P}_1(\xi'_r), \quad \eta = \mathfrak{P}_2(\xi'_r),$$

welche der Gleichung $G(a + \xi, b + \eta) = 0$ genügen.

Leitet man aus der Gleichung

$$G = \xi_1^{\mu_1} g_1(\xi_1, \eta_1)$$

die Relationen ab:

$$\frac{\partial G}{\partial \xi_1} = \frac{\partial G}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial \xi_1} + \frac{\partial G}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial \xi_1}, \quad \frac{\partial G}{\partial \eta_1} = \frac{\partial G}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial \eta_1} + \frac{\partial G}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial \eta_1}$$

oder

$$\begin{aligned} \mu_1 \xi_1^{\mu_1-1} g_1 + \xi_1^{\mu_1} \frac{\partial g_1}{\partial \xi_1} &= \frac{\partial G}{\partial \xi} (-\alpha_1 + a_1 \eta_1) + \frac{\partial G}{\partial \eta} (-\beta_1 + b_1 \eta_1) \\ \xi_1^{\mu_1} \frac{\partial g_1}{\partial \eta_1} &= \frac{\partial G}{\partial \xi} a_1 \xi_1 + \frac{\partial G}{\partial \eta} b_1 \xi_1 \end{aligned}$$

und berechnet aus diesem Gleichungssysteme

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial \xi} &= (b_1 \mu_1 g_1 + b_1 \xi_1 \frac{\partial g_1}{\partial \xi_1} + (\beta_1 - b_1 \eta_1) \frac{\partial g_1}{\partial \eta_1}) \xi_1^{\mu_1-1} \\ \frac{\partial G}{\partial \eta} &= -(a_1 \mu_1 g_1 + a_1 \xi_1 \frac{\partial g_1}{\partial \eta_1} + (\alpha_1 - a_1 \eta_1) \frac{\partial g_1}{\partial \eta_1}) \xi_1^{\mu_1-1}, \end{aligned}$$

so erscheint $\frac{\partial G}{\partial \xi}$ und $\frac{\partial G}{\partial \eta}$ als homogene lineare Function von $\frac{\partial g_1}{\partial \xi_1}$ und $\frac{\partial g_1}{\partial \eta_1}$. Drückt man wieder g_1 und die ersten partiellen Ableitungen durch $g_2, \frac{\partial g_2}{\partial \xi_2}, \frac{\partial g_2}{\partial \eta_2}$ aus usw., so wird

$$\begin{aligned} G &= \xi_1^{\mu_1} \xi_2^{\mu_2} \dots \xi_r^{\mu_r} g_r(\xi_r, \eta_r) \\ \frac{\partial G}{\partial \xi} &= \xi_1^{\mu_1-1} \xi_2^{\mu_2-1} \dots \xi_r^{\mu_r-1} \varphi_r(\xi_r, \eta_r) \\ \frac{\partial G}{\partial \eta} &= \xi_1^{\mu_1-1} \xi_2^{\mu_2-1} \dots \xi_r^{\mu_r-1} \psi_r(\xi_r, \eta_r), \end{aligned}$$

wo φ_r und ψ_r ganze Functionen bezeichnen. Stellt man auch noch $\xi_1, \xi_2, \dots \xi_{r-1}$ durch ξ_r dar, so folgt:

$$\begin{aligned}
 G &= \xi^{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_r} \bar{g}_r(\xi_r, \eta_r) \\
 \frac{\partial G}{\partial \xi} &= \xi^{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_r - 1} \bar{\varphi}_r(\xi_r, \eta_r) \\
 \frac{\partial G}{\partial \eta} &= \xi^{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_r - \nu} \bar{\psi}_r(\xi_r, \eta_r).
 \end{aligned}$$

Nehmen wir nun an, daß die Exponenten $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_r$ gleich bleiben, dann ist vor Allem

$$g_1(\xi_1, \eta_1) = C\eta_1^{\mu_1} + \xi_1 \gamma_1(\xi_1, \eta_1),$$

und wenn $\gamma_1(\xi_1, \eta_1)$ Glieder der $(\mu_1 - 1)$ ten Dimension enthält:

$$(\xi_1, \eta_1)_{\mu_1 - 1},$$

so muß

$$C\eta_1^{\mu_1} + \xi_1(\xi_1, \eta_1)_{\mu_1 - 1}$$

die μ_1 te Potenz eines Factors $(\beta_2' \xi_1 - \alpha_2' \eta_1)$ sein und die Coefficienten α_2', β_2' werden α_2 und β_2 proportional, weil die Function $(\xi_1, \eta_1)_{\mu_1}$ der Voraussetzung nach den Factor $(\beta_2 \xi_1 - \alpha_2 \eta_1)$ enthält. Die GröÙe α_2 wird darnach gewiß von Null verschieden sein.

Durch denselben Schluß ergibt sich, daß unter der Annahme gleicher Exponenten $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_r$ auch $\alpha_3, \alpha_4, \dots, \alpha_r$ nicht Null sein können, aber dann resultirt endlich noch für ξ und η eine bestimmte Darstellung der Gestalt:

$$\begin{aligned}
 \xi &= ((-1)^r \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_r + h_1(\xi_r, \eta_r)) \xi_r \\
 \eta &= ((-1)^r \beta_1 \alpha_2 \dots \alpha_r + h_2(\xi_r, \eta_r)) \xi_r,
 \end{aligned}$$

wo die ganzen Functionen h_1 und h_2 kein constantes Glied mehr enthalten.

Ist $G(x, y)$ eine irreductible Function, so können G und $\frac{\partial G}{\partial \eta}$ keine gemeinsamen Theiler in η besitzen. Dann gibt es zwei ganze Functionen $\Phi(\xi, \eta)$, $\Psi(\xi, \eta)$, deren Grad in η niedriger ist als der von G resp. $\frac{\partial G}{\partial \eta}$ und welche die Beschaffenheit haben, daß

$$\Phi \frac{\partial G}{\partial \eta} + \Psi G$$

eine rationale Function von ξ allein wird. Wir setzen fest, daß Φ und Ψ keine Potenz von ξ zum gemeinsamen Theiler haben und

$$\Phi \frac{\partial G}{\partial \eta} + \Psi G = \xi^\lambda R(\xi), \quad |R(0)| > 0$$

sei, benutzen dann die oben abgeleiteten Formeln, und vergleichen in der entstehenden Relation

$$\begin{aligned}
 &\Phi(\xi_r, \eta_r) \xi_r^{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_r - \nu} \bar{\psi}_r(\xi_r, \eta_r) + \Psi(\xi_r, \eta_r) \xi_r^{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_r} \bar{g}_r(\xi_r, \eta_r) \\
 &= \xi_r^\lambda ((-1)^r \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_r + h_1(\xi_r, \eta_r))^\lambda R(\xi_r, \eta_r)
 \end{aligned}$$

die niedrigsten Potenzen von ξ_r , so wird nothwendig

$$\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_r - \nu = \nu(\mu_1 - 1) \leq \lambda.$$

Da somit ν an die endliche obere Grenze $\frac{1}{\mu_1 - 1}$ gebunden ist, existirt nur eine endliche Anzahl von Transformationen, durch welche der Exponent μ_1 nicht erniedrigt wird.

Mit diesem Satze ist vollständig bewiesen, daß die Umgebung jeder endlichen Stelle (a, b) eines algebraischen Gebildes durch ein oder mehrere Functionenpaare darzustellen ist, je nachdem an dieser Stelle

$$\frac{\partial G}{\partial x} \quad \text{und} \quad \frac{\partial G}{\partial y}$$

nicht beide verschwinden oder beide Null sind.*)

Es handelt sich noch darum, die Darstellung des Gebildes in der Umgebung unendlich ferner Stellen (a, b) zu vollführen, wenn also a oder b oder beide Gröfsen a und b unendlich sind.

Man setze der Reihe nach

$$x = \frac{1}{\xi}, \quad y - b = \eta \quad \text{oder} \quad x - a = \xi, \quad y = \frac{1}{\eta}$$

oder

$$x = \frac{1}{\xi}, \quad y = \frac{1}{\eta}$$

und behandle η als Function von ξ in der Umgebung der Stelle $\xi = 0$. Es ergeben sich die Potenzreihen:

$$\eta = y - b = \xi \mathfrak{P}(\xi) \quad \text{oder} \quad \eta = \frac{1}{y} = \xi \mathfrak{P}(\xi)$$

oder

$$\eta = \frac{1}{y} = \xi \mathfrak{P}(\xi) = \frac{1}{x} \mathfrak{P}\left(\frac{1}{x}\right),$$

wenn

$$\left(\frac{\partial G(\eta, \xi)}{\partial \eta} \right)_{(\eta=0, \xi=0)}$$

von Null verschieden ist, und allgemein existirt ein Functionenpaar

$$\eta = \tau \mathfrak{P}_1(\tau), \quad \xi = \tau \mathfrak{P}_2(\tau).$$

Die Darstellung um die Stelle (∞, b) gilt ausserhalb desjenigen endlichen Bereiches, welcher alle im Endlichen gelegenen singulären Stellen x' enthält, für die die Gleichungen

$$G = 0, \quad \frac{\partial G}{\partial y} = 0$$

gleichzeitig bestehen.

Es ist nunmehr analytisch ausgedrückt, wie man die den x Werthen der Umgebung irgend einer Stelle in dem Bereiche der unabhängigen Variablen x zugehörigen Werthe von y darstellt. Es soll noch kurz das Verhalten der durch eine algebraische Gleichung:

$$G(y, x) = f_0(x) y^m + f_1(x) y^{m-1} + \dots + f_m(x) = 0$$

*) Die in diesem Paragraphen gegebenen Entwicklungen sind durchaus Weierstraß's Vorlesungen entnommen.

— wo $f_\mu(x)$ ganze rationale Functionen sind — definirten Gröfse $y = f(x)$ an den verschiedenartigen Stellen x durch neue Bedingungen charakterisirt werden.

Ist $x = a$ ein Werth, dem eine einfache endliche oder unendliche Wurzel $y = f(a) = b$ zugehört, so wird

$$(f(x) \cdot (x - a))_{x=a} = 0$$

oder

$$(f(x) \cdot (x - a)^{r+1}) = 0,$$

denn es gilt:

$$y - b = (x - a)^r \cdot \left(\frac{d^r y}{dx^r} \right)_{(a,b)} \frac{1}{r!} + (x - a)^{r+1} \left(\frac{d^{r+1} y}{dx^{r+1}} \right)_{(a,b)} \frac{1}{(r+1)!} + \dots$$

beziehungsweise:

$$\frac{1}{y} = (x - a)^r \left(\frac{d^r y}{dx^r} \right)_{(a,\infty)} \frac{1}{r!} + (x - a)^{r+1} \left(\frac{d^{r+1} y}{dx^{r+1}} \right)_{(a,\infty)} \frac{1}{(r+1)!} + \dots$$

Ist an der endlichen Stelle (a, b) neben

$$G(a, b) = 0, \quad \left(\frac{\partial G}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial^2 G}{\partial y^2} \right) = \dots = \left(\frac{\partial^{\mu-1} G}{\partial y^{\mu-1}} \right) = 0$$

aber $\left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)$ von Null verschieden, so wird

$$(f(x) \cdot (x - a)^{\frac{1}{\mu}})_{x=a} = 0,$$

weil die Entwicklung

$$y - b = (x - a)^{\frac{1}{\mu}} \mathfrak{P}((x - a)^{\frac{1}{\mu}})$$

besteht. Ist erst das Product

$$(f(x) \cdot (x - a)^{\frac{r+1}{\mu}})_{x=a} = 0,$$

so muß die Entwicklung lauten:

$$\frac{1}{y} = (x - a)^{\frac{r}{\mu}} \mathfrak{P}((x - a)^{\frac{1}{\mu}})$$

und man sagt: y oder $f(x)$ wird an der Stelle a von der Ordnung $\frac{r}{\mu}$ unendlich.

Tritt an Stelle des ~~unendlichen~~ Werthes a die unendlich ferne Stelle $x = \infty$, so sind

$$\left(f(x) \cdot \left(\frac{1}{x} \right)^{\frac{1}{\mu}} \right)_{x=\infty} = 0 \quad \text{und} \quad \left(f(x) \cdot \left(\frac{1}{x} \right)^{\frac{r+1}{\mu}} \right)_{x=\infty} = 0$$

die Bedingungen dafür, daß y an dem $(\mu - 1)$ fachen Verzweigungspunkte $x = \infty$ endlich oder von der $\left(\frac{r}{\mu} \right)^{\text{ten}}$ Ordnung unendlich ist.

Ist $x = a$ eine μ -elementige Stelle des algebraischen Gebildes, so können die genannten Vorkommnisse zusammenfallen, d. h. dieselbe Stelle kann aus einer oder mehreren einfachen oder Verzweigungsstellen bestehen, und y kann für $x = a$ endlich oder unendlich sein; zum Beweise erinnere man sich nur an die Äquivalenz der Gleichungen $G = 0$ und $g_\varrho = 0$ ($\varrho = 1, 2, \dots r$).

Wir behandeln ein bestimmtes Beispiel:

Es sei die algebraische Gleichung

$$y^m = A \prod_{x=1}^{\lambda} (x - a_x)^{n_x} = 0$$

gegeben und hierin

$$\sum_x n_x = n.$$

Die $(\lambda + 1)$ positiven ganzen Zahlen m und n_x sollen keinen gemeinsamen Theiler haben, der grösste gemeinsame Theiler von m und n heiße m_0 , der von m und n_x m_x und es sei

$$m = m_0 \mu_0 = m_x \mu_x, \quad n = m_0 \nu_0, \quad n_x = m_x \nu_x.$$

In der Umgebung einer endlichen, nicht singulären Stelle (a, b) existirt ein Functionenpaar

$$x = a + t, \quad y = b(1 + t \mathfrak{P}(t)).$$

Ist aber a eine Nullstelle a_x des Polynoms

$$A \prod_x (x - a_x)^{n_x} = R(x),$$

so setze man

$$y_m = A(x - a_x)^{n_x} \prod_{i=1}^{\lambda} (a_x - a_i)^{n_i} \prod_{i=1}^{\lambda} \left(1 + \frac{x - a_x}{a_x - a_i}\right)^{n_i},$$

wo der Strich bei den Productzeichen anzeigen soll, daß unter denselben i nicht mehr den Werth x anzunehmen hat. — Bezeichnet man

$$A \prod_i (a_x - a_i)^{n_i} = B_x^{m_x},$$

so wird

$$y^{\mu_x} = B_x (x - a_x)^{\nu_x} (1 + (x - a_x) \mathfrak{P}(x - a_x)).$$

Sind μ'_x, ν'_x zwei positive ganze Zahlen kleiner als μ_x resp. ν_x , welche der Bedingung

$$\mu_x \nu'_x - \nu_x \mu'_x = 1$$

gehörchen, so wird

$$y^{\mu'_x} B_x^{-\nu'_x \mu_x} = B_x^{-\nu_x \mu'_x} (x - a_x)^{\nu'_x} (1 + (x - a_x) \mathfrak{P}(x - a_x))$$

und setzt man nun

$$B_x^{-\mu'_x} (x - a_x) = t^{\mu'_x},$$

so folgen in der Umgebung der Stelle $(a_x, 0)$ entsprechend den m_x Werthen von B_x ebensoviel Functionenpaare:

$$x = a_x + B_x^{\mu'} t^{\mu'}, \quad y = B_x^{\nu'} t^{\nu'} (1 + B_x^{\mu'} t^{\mu'} \mathfrak{P}(B_x^{\mu'} t^{\mu'})).$$

Um y in der Umgebung der m_0 unendlich fernen Stellen darzustellen, setze man

$$y^{\mu_0} = A^{\frac{1}{m_0}} x^{\nu_0} \prod_{i=1}^{\lambda} \left(1 - \frac{a_i}{x}\right)^{\frac{n_i}{m_0}},$$

hierin aber

$$A^{\frac{1}{m_0}} = B = B^{\mu_0 \nu_0' - \mu_0' \nu_0},$$

dann

$$B^{-\mu_0'} x = t^{-\mu_0},$$

so werden die m_0 Functionenpaare:

$$x = \frac{t^{-\mu_0}}{B^{-\mu_0}}, \quad y = \frac{t^{-\nu_0}}{B^{-\nu_0}} \left(1 + \frac{t^{\mu_0}}{B^{\mu_0}} \mathfrak{P}\left(\frac{t^{\mu_0}}{B^{\mu_0}}\right)\right).$$

Damit sind nun zu jeder Stelle (a, b) die zugehörigen Functionenpaare aufgestellt, und soweit das einzelne Paar eine Geltung hat, soweit sind die zusammengehörigen Werthe (x, y) durch dasselbe definirt.

§ 40. Transformation algebraischer Gleichungen.

Wenn jetzt die durch eine algebraische Gleichung $G(y, x) = 0$ definirte Gröfse y in der Umgebung jeder Stelle $x = a$ dargestellt werden kann und daselbst die zusammengehörigen Werthe x und y stets durch eine endliche Anzahl von Functionenpaaren auszudrücken sind, so läßt sich das Verhalten einer rationalen Function von x und y

$$R(x, y) = \frac{g_1(x, y)}{g_2(x, y)},$$

wo die ganzen Functionen g_1 und g_2 keinen gemeinsamen Theiler haben mögen, in der Umgebung jeder Stelle (a, b) angeben, indem man die daselbst bestehenden Functionenpaare für x und y in $R(x, y)$ einsetzt. Bezeichnet $R(a, b)$ den Werth von $R(x, y)$ an der gegebenen Stelle, so wird

$$R(x, y) - R(a, b)$$

durch eine in der Umgebung der Stelle $t = 0$ convergente Potenzreihe nach t dargestellt, sofern $R(a, b)$ endlich ist; andernfalls beginnt die Entwicklung mit einem Gliede ct^{-k} . Nach dem Werthe des Potenzexponenten k sagt man, daß die rationale Function die k fache Stelle (a, b) besitzt und von der k ten Ordnung unendlich wird.

Ist wie bisher $G(y, x)$ in y vom m ten Grade und sind y_1, y_2, \dots, y_m die m einem x -Werthe zugehörigen Werthe von y , so kann man in

$$\frac{g_1(x, y_\mu)}{g_2(x, y_\mu)} = \frac{g_1(x, y_\mu) g_2(x, y_1) g_2(x, y_2) \dots g_2(x, y_{\mu-1}) g_2(x, y_{\mu+1}) \dots g_2(x, y_m)}{g_2(x, y_1) g_2(x, y_2) \dots g_2(x, y_m)}$$

den Nenner, der eine symmetrische Function von y_1, y_2, \dots, y_m ist, als

Function von x allein darstellen, der Zähler hingegen ist eine Function von x und y . Die rationale Function erhält also die Gestalt:

$$R(x, y) = \frac{f(x, y)}{g(x)}$$

und hierin kann $f(x, y)$ gewiss nicht den Theiler $G(x, y)$ haben, wenn $R(x, y)$ nicht überall verschwinden soll. Weil $G(x, y)$ irreductibel ist, haben $f(x, y)$ und $G(x, y)$ überhaupt keinen Theiler gemein.

Wir fragen nun nach den Stellen (x, y) , für welche $R(x, y)$ einen bestimmten Werth s annimmt.

Bildet man das Product

$$\prod_{\mu=1}^m (s - R(x, y_{\mu})) = \frac{\psi(x)s^m + \psi_1(x)s^{m-1} + \dots + \psi_m(x)}{\psi(x)} = \frac{\Psi(x, s)}{\psi(x)},$$

wo y_{μ} die zu einem x gehörigen y -Werthe sind und die ganzen Functionen $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m$ keinen gemeinsamen Theiler haben sollen, so wird einer der m Werthe $R(x, y_{\mu})$ gleich s , wenn x der Gleichung

$$\Psi(x, s) = 0$$

entlehnt ist. Dabei denken wir diejenigen x Werthe ausgeschlossen, für welche auch $\psi(x)$ verschwindet, weil dann unser Product in der unbestimmten Form $\frac{0}{0}$ erscheint.

Um zu sehen, wie oft eine rationale Function $R(x, y)$ einen Werth s annimmt, muß man die Beschaffenheit von $\Psi(x, s)$ erkennen, und dazu behaupten wir, $\Psi(x, s)$ ist irreductibel oder doch die ganzzahlige Potenz einer irreductiblen Function.

Es sei $\Psi(x, s)$ das Product verschiedener irreductibler Factoren $\Psi_i(x, s)$ und x' eine Stelle, der nur endliche Wurzeln s' der Gleichung $\Psi_i = 0$ entsprechen, dann gehört zu s' eine Lösung der Gleichung $G(x, y) = 0$, für die $s' = R(y, x')$ verschwindet, denn andernfalls könnte das obige Product nicht Null sein. Da somit jede der Functionen $\Psi_i(x, R(x, y))$ für jede Stelle der Umgebung von x' eine Wurzel y mit $G(x, y)$ gemein hat, sind sie durch G theilbar. Jetzt aber sieht man, daß je zwei der Functionen $\Psi_i(x, s)$ für jede Stelle aus der Nähe von x' auch eine gemeinsame Lösung s besitzen und darum jede durch die andere theilbar ist. Sie stimmen also bis auf einen von s unabhängigen Factor überein, doch weil $\Psi(x, s)$ keinen solchen Factor enthält, wird

$$\Psi(x, s) = (\Psi_i(x, s))^{\lambda},$$

wo λ ein Theiler von m ist. Gleichzeitig wird der Coefficient von s^m , nämlich $\psi(s)$, die λ^{te} Potenz einer ganzen Function $\psi_i(x)$, und man kann das Product in der Form schreiben:

$$\prod (s - R(x, y_{\mu})) = \left(\frac{\Psi_i(x, s)}{\psi_i(x)} \right)^{\lambda}.$$

Ist der Grad von Ψ_i in x ν , so gehören gemäß der Gleichung $\Psi_i = 0$ zu einem Werthe von s ν Werthe x und jedem derselben entsprechen λ verschiedene Factoren $s - R(x, y_x^{(\mu)})$. Je λ Factoren des Productes liefern Ψ_i .

Hat man die zu einem s -Werthe gehörenden Werthe x gefunden, so gehen die entsprechenden y -Werthe aus den Gleichungen

$$G(x, y) = 0 \quad \text{und} \quad \Psi(x, R(x, y)) = 0 \quad \text{oder} \quad s - R(x, y) = 0$$

hervor. Ist $\Psi(x, s)$ irreductibel, so kann die diese y definirende Gleichung, deren Coefficienten rationale Functionen von x und s sind, in y gewiß nicht von höherem als dem ersten Grade sein und y wird rational durch x und s darstellbar, denn andernfalls entsprächen einem x -Werthe mehr als m Werthe y , und folglich gehören zu einem Werthe s so viele Stellen (x, y) als der Grad von $\Psi(x, s)$ in x anzeigt. Ist aber Ψ die λ^{te} Potenz von Ψ_i , so gehören zu einem Werthepaare (s, x) λ im allgemeinen von einander verschiedene y -Werthe und zu einem Werthe s $\lambda \nu$ Stellen (x, y) , wo $\lambda \nu = k$ ist.*

Diese Sätze gelten auch, wenn man s einen Werth gibt, für den mehrere der x -Werthe einander gleich werden, nur muß man diese und die y -Werthe stets in der gehörigen Vielheit zählen. Hat s einen Werth, dem gerade ein x zugehört, welches die Function $\psi(x)$ oder $\psi_i(x)$ zum Verschwinden bringt, so werden Grenzbetrachtungen die fortdauernde Gültigkeit der Sätze bestätigen können. Also jeden Werth s wird die rationale Function $R(x, y)$ an gleich viel Stellen (x, y) annehmen. Die Anzahl dieser Stellen nennt man den *Grad der rationalen Function*.

Sind neben der Gleichung $G(x, y) = 0$ zwei rationale Functionen

$$\xi = R_1(x, y), \quad \eta = R_2(x, y)$$

von dem μ^{ten} und ν^{ten} Grade gegeben, so entspricht jeder Stelle (x, y) ein Werthepaar (ξ, η) . Es entsteht nur die Frage, wann umgekehrt einem Werthesysteme (ξ, η) eine einzige Stelle (x, y) zuzuordnen ist.

Zu einem Werthe ξ gehören μ Werthepaare (x, y) und μ Werthe η , die man auch aus einer Gleichung findet, welche zwischen ξ und η allein besteht. Nennt man die zu ξ gehörigen μ Werthepaare (x, y) :

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots (x_\mu, y_\mu),$$

und bildet

$$\prod_{\kappa=1}^{\mu} (\eta - R_2(x_\kappa, y_\kappa)),$$

so ist dieses Product eine irreductible Function von ξ und η oder die Potenz einer solchen. Besteht nämlich zwischen x und ξ die irreductible

*) Vergleiche die Darstellung von Weber und Dedekind in dem 92. Bd. des Journals für reine und angewandte Mathematik §§ 1, 2, 13.

Gleichung $\Psi_1(\xi, x) = 0$ und ist y rational durch x und ξ darstellbar, so geht das Product in ein nächstes über:

$$\prod_{x=1}^{\mu} (\eta - R'_2(x_x, \xi)),$$

welches wegen der symmetrisch eintretenden Gröfßen x_x rational durch η und die Coefficienten von $\Psi_1(\xi, x) = 0$ auszudrücken ist; sind ja doch die zu einem ξ gehörigen Gröfßen x_x gerade die Wurzeln dieser Gleichung. Es folgt also in der That die Existenz einer Gleichung:

$$\prod_x (\eta - R_2(x_x, y_x)) = \left(\frac{\Phi_2(\xi, \eta)}{\Psi_2(\xi)} \right)^{\lambda'}.$$

Sollte $\Psi_1(\xi, x)$ die λ^{te} Potenz eines irreductiblen Factors und y nicht rational durch x und ξ darstellbar sein, so führt eine einfache Substitution

$$\bar{x} = x + cy, \quad \bar{y} = y$$

zu einer Gleichung $\bar{G}(\bar{x}, \bar{y}) = 0$ der Beschaffenheit, daß die zu der rationalen Function $\xi = R_1(\bar{x}, \bar{y})$ gehörige Gleichung zwischen ξ und \bar{x} irreductibel ist, d. h. man kann c so wählen, daß einem Werthe ξ nur verschiedene Werthe \bar{x} entsprechen:

$$x_1 + cy_{x_1}^{(1)}, \dots, x_1 + cy_{x_1}^{(\lambda)}, \dots, x_r + cy_{x_r}^{(1)}, \dots, x_r + cy_{x_r}^{(\lambda)}.$$

Die Gleichung zwischen ξ und η lautet $\Phi_2(\xi, \eta) = 0$. Ist $\lambda' = 1$, so erreicht η^* in $\Phi_2(\xi, \eta)$ den Grad μ , denn es gibt zu einem ξ -Werthe μ Werthepaare (x, y) . In diesem Falle $\lambda' = 1$ kann man umgekehrt x und y rational durch ξ und η darstellen, denn zufolge der Relationen

$$\Psi_1(\xi, x) = 0, \quad \eta - R'_2(\xi, x) = 0$$

ist zunächst x rational durch ξ und η auszudrücken und ebenso y , denn y ist eine rationale Function von x und ξ . —

Zwei rational in einander transformirbare algebraische Gleichungen

$$G(x, y) = 0, \quad \Gamma(\xi, \eta) = 0,$$

deren Stellen (x, y) und (ξ, η) einander wechselseitig entsprechen, zählt man als zu einer Klasse gehörig und eine jede Gleichung ist als Repräsentantin einer ganzen Klasse aufzufassen.

Will man einer Repräsentantin eine bestimmte Normalform geben, so kann für diese Form die geringste Constantenzahl oder die niedrigste Dimension oder eine andere Forderung maßgebend werden; die Zweckmäßigkeit hat hier zu entscheiden.

Beachtet man, daß die verschiedenen algebraischen Gebilde einer Klasse verschiedenartige singuläre Stellen haben werden, so kann man nach denjenigen Transformationen

$$\xi = R_1(x, y), \quad \eta = R_2(x, y)$$

fragen, durch welche die entstehende transformirte Gleichung

$$\Gamma(\xi, \eta) = 0$$

besondere singuläre Stellen erhält, z. B. eine Stelle, in deren Umgebung das neue algebraische Gebilde durch ein einziges Functionenpaar dargestellt wird. Allerdings bedarf die Erledigung dieser Transformationen weitläufiger Untersuchungen, denn wir werden leicht gewahr, daß eine rationale Function $s = R(x, y)$ mit vorgeschriebenen Unendlichkeitsstellen durchaus nicht existiren muß und deshalb sind wir nicht sicher, ob man eine Gleichung derselben Klasse angeben kann, welche irgend gestellte Forderungen erfüllt. Man muß also nachsehen, welche Forderungen mit der Natur einer rationalen Function $R(x, y)$ verträglich sind, sofern zwischen x und y eine algebraische Gleichung $G(x, y) = 0$ besteht.

Wir wollen zur Erläuterung zeigen, daß eine rationale Function $s = R(x, y)$, die nur an einer Stelle und dort von der ersten Ordnung unendlich wird, im Allgemeinen nicht existiren kann, daß vielmehr solche Functionen nur möglich sind, wenn die Gleichung

$$G(x, y) = 0$$

eine besondere Beschaffenheit aufweist.

Angenommen, daß es eine solche Function $s = R(x, y)$ gibt, so kann sie jeden Werth s nur einmal annehmen. Zwischen s und x besteht dann eine Gleichung ersten Grades, und x und y lassen sich als rationale Functionen von s allein darstellen. Ist $x = a_0$ eine reguläre Stelle, der ein Werth $y = b_0$ zugehört, so kann man jetzt x und y durch recurrente Reihen

$$x = a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots$$

$$y = b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots$$

ausdrücken. Es existiren demnach Relationen:

$$\alpha_0 a_{n+\nu} + \alpha_1 a_{n+\nu-1} + \dots + \alpha_p a_{n+\nu-p} = 0 \quad (\nu = 0, 1, 2 \dots)$$

$$\beta_0 b_{m+\mu} + \beta_1 b_{m+\mu-1} + \dots + \beta_q b_{m+\mu-q} = 0 \quad (\mu = 0, 1, 2 \dots).$$

Substituirt man die Reihen für x und y in die Potenzreihe

$$y - b_0 = (x - a_0) \cdot \mathfrak{P}(x - a_0) = (x - a_0) \cdot \sum_{i=0}^{\infty} c_i (x - a_0)^i,$$

welche die Umgebung der Stelle (a_0, b_0) darstellt, und vergleicht die Coefficienten gleich hoher Potenzen von s , so ergeben sich wegen der Relationen in den Größen a und b zwischen den von den Coefficienten der Function $G(x, y)$ abhängigen Constanten c_i und somit zwischen den Constanten von $G(x, y)$ besondere Beziehungen.

Soll also eine rationale Function $R(x, y)$ ersten Grades existiren, so muß die Gleichung $G(x, y) = 0$ eine specielle Natur besitzen und um diese allgemeine Einsicht war es uns hier zu thun.

Man erkennt nun die Berechtigung und Wichtigkeit der folgenden Frage: Welches ist die geringste Anzahl von Stellen (a, b) , welche für eine rationale Function $R(x, y)$ Unendlichkeitsstellen erster Ordnung sein müssen, oder welches ist der geringste Grad einer rationalen Function? Existirt keine rationale Function $R(x, y)$ mit ϱ einfachen Unendlichkeitsstellen, gibt es aber rationale Functionen mit $\varrho + 1$ beliebigen Unendlichkeitsstellen, so heisst die offenbar endliche Zahl ϱ der *Rang* oder das *Geschlecht* des algebraischen Gebildes. —

Wählt man zwei rationale Functionen ξ und η vom $(\varrho + 1)^{\text{ten}}$ und $(\varrho + 2)^{\text{ten}}$ Grade, deren Unendlichkeitsstellen alle in eine einzige (x_0, y_0) zusammenfallen, und leitet man die zwischen ξ und η bestehende Gleichung $\Gamma(\xi, \eta) = 0$ ab, die in η von dem $(\varrho + 1)^{\text{ten}}$, in ξ von dem $(\varrho + 2)^{\text{ten}}$ Grade sein wird, so besagen die in der Umgebung von (x_0, y_0) giltigen Entwicklungen für ξ und η :

$$\xi = a_0 \frac{1}{\tau^{\varrho+1}} + a_1 \frac{1}{\tau^{\varrho}} + \cdots + a_{\varrho} \frac{1}{\tau} + \mathfrak{P}_1(\tau)$$

$$\eta = b_0 \frac{1}{\tau^{\varrho+2}} + b_1 \frac{1}{\tau^{\varrho+1}} + \cdots + b_{\varrho+1} \frac{1}{\tau} + \mathfrak{P}_2(\tau),$$

dafs das neue algebraische Gebilde $\Gamma(\xi, \eta) = 0$ in der Umgebung der Stelle $(\xi = \infty, \eta = \infty)$ nur durch ein Functionenpaar dargestellt wird, indem einem Werthe von ξ wirklich $(\varrho + 1)$ verschiedene Werthe η entsprechen, wie es die Gleichung verlangt; es ist ja

$$\eta = \mathfrak{P}\left(\xi^{\frac{1}{\varrho+1}}\right).$$

Die Gleichung $\Gamma(\xi, \eta) = 0$ ist gleichzeitig mit $G(x, y) = 0$ irreductibel, und $\Gamma(\xi, \eta)$ ist nicht die Potenz einer irreductiblen Function von ξ und η , gehört zu derselben Klasse und hat offenbar denselben Rang ϱ .

Diese Gleichung $\Gamma(\xi, \eta) = 0$ werden wir bei dem Beweise zu benutzen haben, dafs die durch eine irreductible Gleichung $G(x, y) = 0$ definirte Gröfse y eine *monogene* analytische Function ist.

§ 41. Beweis für die Monogenität der algebraischen Function.

Bisher ist nur nachgewiesen, dafs die einer irreductibeln algebraischen Gleichung

$$G(x, y) = f_0(x)y^m + f_1(x)y^{m-1} + \cdots + f_m(x) = 0$$

entstammende Gröfse y in der Umgebung jeder Stelle $x = a, y = b$ durch ein oder mehrere Functionenpaare

$$x - a = \mathfrak{P}_1(t), \quad y - b = \mathfrak{P}_2(t)$$

dargestellt werden kann, ob aber alle Functionenpaare aus einander abzuleiten sind und ein Functionenpaar als die Quelle aller anderen zu betrachten ist, das mufs erst untersucht werden.

Früher haben wir nur von den aus einem Elemente

$$y - b = \mathfrak{P}(x - a)$$

abgeleiteten Fortsetzungen gesprochen. Jetzt wollen wir den Begriff der Fortsetzung entsprechend der Darstellungsart zweier durch eine Gleichung $G(x, y) = 0$ zusammenhängenden Größen durch Potenzreihen neuer Variablen t erweitern.

Ist von vornherein ein Functionenpaar

$$x - a = \mathfrak{P}_1(t), \quad y - b = \mathfrak{P}_2(t)$$

gegeben, nach welchem einem t des gemeinsamen Convergenzbereiches der Reihen \mathfrak{P}_1 und \mathfrak{P}_2 ein Werthepaar x, y zugehört, und verschiedenen Stellen t verschiedene Werthesysteme (x, y) , und endlich einem Werthepaare (x, y) eine Stelle t entspricht, und nennt man die Gesamtheit der dem Functionenpaare entstammenden Werthesysteme (x, y) im Gebiete der Größen x und y ein *Element eines analytischen Gebildes*, so kann man aus diesem unendlich viele Elemente ableiten. Setzt man

$$t = \mathfrak{P}(\tau),$$

wo $\mathfrak{P}(0)$ eine Stelle t_0 in dem genannten Bereiche der t ist und τ eindeutig durch t auszudrücken ist, so daß $\mathfrak{P}(\tau)$ ein Glied erster Dimension besitzt, so erhält man ein neues Element, das an unendlich vielen Stellen der Umgebung von t_0 mit dem ersten übereinstimmt. Die Elemente heißen daher *coincidirend*. Dort, wo die Elemente nicht übereinstimmen, ist das eine die Fortsetzung des zweiten.

Zwei Functionenpaare der oben genannten Art:

$$x - a = \mathfrak{P}_1(t), \quad y - b = \mathfrak{P}_2(t)$$

$$x - a' = \mathfrak{P}_1'(\tau), \quad y - b' = \mathfrak{P}_2'(\tau)$$

gehören demselben Gebilde an, wenn sie coincidiren, d. h. wenn sie in der Umgebung einer Stelle (α, β) ihres Giltigkeitsbereiches übereinstimmen. Dazu ist nothwendig, daß für ein $t = t_0$ und $\tau = \tau_0$ $x = \alpha, y = \beta$ und

$$t - t_0 = (\tau - \tau_0) \mathfrak{P}(\tau - \tau_0)$$

wird, wo $\mathfrak{P}(\tau_0 - \tau_0)$ von Null verschieden ist, denn dann sind die Elemente aus einander abzuleiten und die aus je einem Functionenpaare entspringenden Elemente

$$y - b = \overline{\mathfrak{P}}(x - a) \quad \text{und} \quad y - b' = \overline{\mathfrak{P}}'(x - a')$$

sind Fortsetzungen früheren Sinnes.

Die mittelbar zusammenhängenden Functionenpaare oder Elemente eines analytischen Gebildes brauchen wir wohl nicht besonders zu erklären. —

Jetzt ist es leicht, den Zusammenhang zweier Elemente

$$y - b_1 = \mathfrak{P}_1(x - a_1), \quad y - b_2 = \mathfrak{P}_2(x - a_2),$$

die aus einer irreductiblen algebraischen Gleichung $G(x, y)$ entnommen sind, zu beweisen.

Zu diesem Zwecke gehe man von dem durch die Gleichung $G(y, x) = 0$ definirten algebraischen Gebilde zu dem oben besprochenen über, dessen Gleichung $\Gamma(\eta, \xi) = 0$ ist. Sind dann die den Stellen des ersten Gebildes (a_1, b_1) , (a_2, b_2) entsprechenden Stellen des zweiten (α_1, β_1) , (α_2, β_2) , so kann man von α_1 und α_2 aus auf zwei über keine singuläre Stelle ξ führenden Wegen nach den in der Umgebung der Stelle $\xi = \infty$ gelegenen Stellen α'_1, α'_2 gelangen, wobei $\eta = \beta_1, \beta_2$ die Werthe β'_1, β'_2 erhalten mögen. Unter der Umgebung von $\xi = 0$ ist hier diejenige verstanden, welche aufser $\xi = \infty$ keine weitere singuläre Stelle enthält. Da nun die Umgebung der unendlich fernen Stelle $(\xi, \eta) = (\infty, \infty)$ durch das Functionenpaar

$$\frac{1}{\xi} = \tau^{e+1} \mathfrak{P}_1(\tau), \quad \frac{1}{\eta} = \tau^{e+2} \mathfrak{P}_2(\tau)$$

vollständig dargestellt wird, gibt es einen daselbst von α'_1 nach α'_2 führenden Weg, auf welchem β'_1 in β'_2 übergeht, denn das unendlich ferne Element coincidirt mit denen um die Stelle (α'_1, β'_1) und (α'_2, β'_2) und darum sind die Elemente

$$\eta - \beta'_1 = \overline{\mathfrak{P}_1}(\xi - \alpha'_1) \quad \text{und} \quad \eta - \beta'_2 = \mathfrak{P}_2'(\xi - \alpha'_2)$$

zusammenhängend oder aus einander ableitbar.

Wenn endlich ξ von α_1 über α'_1 nach α'_2 und nach α_2 geht, gelangt man mit β_1 nach β_2 und entsprechend mit b_1 nach b_2 .

Damit ist nun die Monogenität der durch eine irreductible algebraische Gleichung $G(x, y) = 0$ definirten Gröfse y erwiesen; sie ist eine monogene analytische Function und heifst *algebraische Function*.

Unser algebraisches Gebilde wird durch eine endliche Anzahl von Functionenpaaren dargestellt, denn es gibt nur eine endliche Anzahl von Unendlichkeitsstellen für die algebraische Function und nur eine endliche Anzahl von Discriminantenlösungen, und in der Umgebung mehrfacher Punkte genügt zur Darstellung ebenfalls eine endliche Anzahl von Functionenpaaren.

Wenn umgekehrt eine mit einer unabhängigen Variablen x im Zusammenhange stehende monogene analytische Function y den Bedingungen genügt:

- 1) y nimmt für jeden Werth von $x = a$ mit Ausnahme einer endlichen Anzahl von Stellen $x = a$ m verschiedene Werthe an,
- 2) und zwar lassen sich in der Umgebung der Stellen a die zugehörigen Werthe von y aus m nach positiven ganzen Potenzen von $(x - a)$ fortschreitenden convergenten Reihen berechnen,
- 3) indess die den Stellen x aus der Reihe der singulären Stellen a entsprechenden m y -Werthe durch eine endliche Anzahl con-

vergenger Reihen darzustellen sind, welche nach ganzen oder gebrochenen Potenzen von $(x - a)$ fortschreiten und nur eine endliche Anzahl negativer Potenzen enthalten, dann ist y die Lösung einer irreductibeln algebraischen Gleichung m^{ten} Grades, deren Coefficienten rationale Functionen von x sind.

Offenbar genügt y als m -werthige analytische Function einer Gleichung m^{ten} Grades, deren Coefficienten eindeutige analytische Functionen sind. Doch können diese nur rationale Functionen sein, indem die Potenzsummen der zu einem Werthe x gehörigen y -Werthe eindeutige Functionen ohne wesentlich singuläre Stellen werden. —

Nun verlassen wir das durch eine Gleichung definirte algebraische Gebilde und verzichten auf die Construction der rationalen Functionen mit vorgegebenen Unendlichkeitsstellen und auf die Ermittlung der Abhängigkeit des Ranges eines Gebildes von der Beschaffenheit desselben, weil uns der bloße Begriff der algebraischen Gleichungen verschiedenen Ranges späterhin genügen wird.

§ 42. Systeme algebraischer Gleichungen.

Das analytische Gebilde m^{ter} Stufe im Gebiete von $(m + n)$ Größen.

Es sollen die voranstehenden Untersuchungen auf ein System n algebraischer Gleichungen mit $n + m$ variablen Größen übertragen werden. Bezeichnen wir die unabhängigen Variablen mit $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m}$, die abhängigen mit x_1, x_2, \dots, x_n und die in den letzteren ganzen rationalen Functionen, die gleich Null gesetzt sein sollen, mit

$$G_v(x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots, x_{n+m}),$$

in welchen die Coefficienten analytische Functionen von $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m}$ mit einem gemeinsamen Stetigkeitsbereiche sind, so möge vorausgesetzt werden, daß durch Elimination von je $(n - 1)$ der Größen x_1, x_2, \dots, x_n n algebraische Gleichungen

$$g_v(x_v, x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m}) = 0$$

hervorgehen, aber niemals eine Gleichung in den m Variablen $x_{n+\mu}$ ($\mu = 1, 2, \dots, m$) allein resultirt, denn dann ließe sich das gegebene Gleichungssystem auf ein anderes reduciren, welches eine Variable weniger hat, indem etwa $x_{n+\mu}$ als eine von den übrigen $(m - 1)$ Variablen abhängige Größe anzusehen wäre.

Die genannte Elimination von $(n - 1)$ Variablen z. B. x_1, \dots, x_{n-1} besteht nicht etwa in der successiven Bildung der $(n - 1)$ Resultanten $R_{v_1}^{(1)}(x_2, x_3, \dots, x_{n+m})$, der Bildung der $(n - 2)$ Resultanten $R_{v_2}^{(1)}(x_3, \dots, x_{n+m})$ der Gleichungen $R_{v_1}^{(1)} = 0$ usw., endlich in der Bildung der Resultante zweier Gleichungen

$$R_1^{(n-1)}(x_{n-1}, x_n, \dots, x_{n+m}) = 0, \quad R_2^{(n-1)}(x_{n-1}, x_n, \dots, x_{n+m}) = 0,$$

sondern man muß vielmehr die $(n-1)$ Variablen gleichzeitig eliminiren, indem man eine der Gleichungen $G_v = 0$, deren Ordnung in x_1, \dots, x_n k_v sei, mit einer ganzen Function Γ_v von x_1, \dots, x_n multiplicirt, dann in dem Producte $G_v \Gamma_v$ mit Hilfe der übrigen Gleichungen $G_v = 0$ die durch $x_1^{k_1}, \dots, x_{n-1}^{k_{n-1}}$ theilbaren Glieder fortschafft und über die willkürlichen Constanten von Γ_v so verfügt, daß $G_v \Gamma_v$ bloß Glieder in der n ten Variablen x_n behält. Es resultirt dann $g_n(x_n, x_{n+1}, \dots, x_{n+m})$. (Vergleiche Serret Algebra Bd. 1, Cap. 4.) Die Werthesysteme (x_1, \dots, x_n) , welche den Gleichungen $G_v = 0$ genügen, befriedigen auch die Gleichungen $g_v = 0$, weil man offenbar g_v die Form geben kann $\sum_{v=1}^n G_v \Gamma_v$. —

Nun könnte man jede einzelne Gleichung $g_v = 0$ für sich behandeln, doch wenn man dann in der Umgebung einer Stelle

$$x_{n+\mu} = a_{n+\mu} \quad (\mu = 1, 2, \dots, m),$$

welcher die m , Werthe

$$x_v = a_v^{(1)}, a_v^{(2)}, \dots, a_v^{(m_v)}$$

zugehören mögen, die Darstellungen finden kann:

$$x_v - a_v^{(\mu_v)} = \mathfrak{P}_{\mu_v}^{(\nu)}(x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m} | a_{n+\mu}) \quad (\mu_v = 1, 2, \dots, m_v),$$

wo $\mathfrak{P}_{\mu_v}^{(\nu)}$ kein constantes Glied enthält, so muß man untersuchen, ob

n dieser $N = \sum_{v=1}^n m_v$ Potenzreihen $\mathfrak{P}_{\mu_v}^{(\nu)}$ einen gemeinsamen Convergence-

bereich besitzen, derart daß irgend einer Stelle desselben Werthesysteme für x_1, x_2, \dots, x_n zugehören, welche gleichzeitig die n Gleichungen $g_v = 0$ erfüllen. Denn bei der Frage, ob ein Gleichungssystem n analytische Functionen definirt, hat man in dem $2m$ fach ausgedehnten Werthegebiete der Größen $x_{n+\mu}$ Stellen ausfindig zu machen, in deren Umgebung n convergente Potenzreihen für x_1, x_2, \dots, x_n existiren, welche das Gleichungssystem identisch befriedigen.

Die Entscheidung hierüber könnte man dadurch herbeiführen, daß man nachsieht, ob in der Umgebung einer Stelle $(a_{n+1}, a_{n+2}, \dots, a_{n+m})$ des gemeinsamen Stetigkeitsbereiches der Coefficienten der Gleichungen $g_v = 0$ ein Bereich existirt, an dessen Stellen keine der Discriminanten

$$D_v(x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m})$$

verschwindet und keine der Größen x_v unendlich wird.

Andrerseits steht uns der Weg von den Gleichungen $g_v = 0$ zu einem oder mehreren denselben äquivalenten sogenannten Normalgleichungssystemen der Form

$$x_v = \frac{H_v(y, x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m})}{\frac{\partial H}{\partial y}} \quad (v = 1, 2, \dots, n)$$

mit einer solchen Grenzstelle (ξ'_ν) angeben derart, daß die Grenzwerte $\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n$ durch Potenzreihen in den Variablen $\xi_{n+1}, \xi_{n+2}, \dots, \xi_{n+m}$ auszudrücken sind, und die gegebenen Gleichungen erfüllen. Bildet man die Beziehungen

$$A_{\nu,1}\xi_1 + A_{\nu,2}\xi_2 + \dots + A_{\nu,n}\xi_n = f_\nu(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+m})$$

$$(\nu = 1, 2, \dots, n),$$

wo f_ν keine Glieder erster Dimension in den Größen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ allein enthält, setzt rechts für $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ Null und löst die entstehenden Gleichungen nach den links stehenden Unbekannten — was angeht, da die Determinante nicht verschwindet —, so findet man etwa

$$\xi_1 = \xi_1^{(1)}, \quad \xi_2 = \xi_2^{(1)}, \quad \dots, \quad \xi_n = \xi_n^{(1)}.$$

Die Substitution dieser Werthe in die Ausdrücke f_ν gibt neue Gleichungen mit den Lösungen

$$\xi_1 = \xi_1^{(2)}, \quad \xi_2 = \xi_2^{(2)}, \quad \dots, \quad \xi_n = \xi_n^{(2)}.$$

So fortfahrend gelangt man zu Grenzwerten

$$\xi_1 = \xi_1', \quad \xi_2 = \xi_2', \quad \dots, \quad \xi_n = \xi_n',$$

welche den vorgegebenen Gleichungen genügen und als Potenzreihen nach den Variablen $\xi_{n+1}, \xi_{n+2}, \dots, \xi_{n+m}$ auszudrücken sind, indem bei der Zusammensetzung nur Additionen und Multiplicationen zu vollziehen sind und die Summen ganzer rationaler Functionen in Potenzreihen umgeformt werden können, wenn die Summen gleichmäßig convergiren.

Den Convergenzbeweis führen wir praktischer gleich in dem Falle, wo wir die $n + m$ Größen ξ durch Potenzreihen nach m neuen Variablen t_1, t_2, \dots, t_m darstellen, wie das bei dem algebraischen Gebilde $G(y, x) = 0$ geschah.

Verbindet man mit den n gegebenen Gleichungen

$$A_{\nu,1}\xi_1 + A_{\nu,2}\xi_2 + \dots + A_{\nu,n+m}\xi_{n+m} = \varphi_\nu(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+m})$$

$$(\nu = 1, 2, \dots, n)$$

weitere m Gleichungen, welche m neue Variable t_μ mit den Größen ξ in Zusammenhang bringen:

$$A_{n+\mu,1}\xi_1 + A_{n+\mu,2}\xi_2 + \dots + A_{n+\mu,n+m}\xi_{n+m} = t_\mu$$

$$(\mu = 1, 2, \dots, m),$$

wo die Constanten $A_{n+\mu, \nu+\mu'}$ so gewählt sein mögen, daß die Determinante $(n + m)^{\text{ter}}$ Ordnung

$$\begin{vmatrix} A_{1,1} & \dots & A_{1,n+m} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{n+m,1} & \dots & A_{n+m,n+m} \end{vmatrix}$$

nicht verschwindet, und bestimmt aus den $(n+m)$ Gleichungen durch das frühere Verfahren denselben genügende Grenzwerte $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+m}$ als Potenzreihen der Größen t_1, t_2, \dots, t_m ,

$$\xi_\lambda = \mathfrak{P}_\lambda(t_1, t_2, \dots, t_m),$$

so besitzen diese einen gemeinsamen Convergencebereich um die Stelle (0).

Zum Convergencebeweise ersetze man in den Lösungen der $(n+m)$ Gleichungen

$$\xi_1 = a_{11}t_1 + a_{12}t_2 + \dots + a_{1m}t_m + \psi_1(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+m})$$

$$\xi_2 = a_{21}t_1 + a_{22}t_2 + \dots + a_{2m}t_m + \psi_2(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+m})$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\xi_{n+m} = a_{n+m,1}t_1 + a_{n+m,2}t_2 + \dots + a_{n+m,m}t_m + \psi_{n+m}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+m}),$$

wo die Ausdrücke ψ_λ keine Constanten und keine Glieder erster Dimension enthalten, auf daß in ihrer Darstellung durch eine $(n+m)$ -fache in einem Bereiche $|\xi_\lambda| < R$ convergente Summe:

$$\sum_{(\nu_\lambda)=0}^{\infty} b_{\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_{n+m}}^{(\lambda)} \xi_1^{\nu_1} \xi_2^{\nu_2} \dots \xi_{n+m}^{\nu_{n+m}}$$

$\sum_{\lambda=1}^{n+m} \nu_\lambda \geq 2$ sein muß, die Coefficienten $a_{\lambda, \mu}$ durch eine solche positive Größe γ , daß der absolute Betrag:

$$|a_{\lambda, \mu}| \leq \gamma$$

ist. Ist dann für jedes (λ) und ein $r < R$

$$|b_{\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_{n+m}}^{(\lambda)}| \leq g r^{-(\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_{n+m})},$$

so werden die Coefficienten der Reihe für

$$g \prod_{\lambda=1}^{n+m} \left(\frac{1}{1 - \frac{\xi_\lambda}{r}} \right) - \left\{ g + g \frac{\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_{n+m}}{r} \right\}$$

nicht kleiner als die absoluten Beträge der Coefficienten gleichnamiger Glieder jeder Reihe ψ_λ , und umsoweniger kleiner als die der Reihe

$$\frac{g}{1 - \frac{\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_{n+m}}{r}} - \left\{ g + g \frac{\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_{n+m}}{r} \right\}.$$

Sollten nun aus den $(n+m)$ Gleichungen:

$$\xi_\lambda = \gamma(t_1 + t_2 + \dots + t_m) + g \sum_{x=2}^{\infty} \left(\frac{\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_{n+m}}{r} \right)^x$$

$$(\lambda = 1, 2, \dots, n+m)$$

$(n+m)$ convergente Potenzreihen für die Größen ξ_λ hervorgehen, so können wir sicher sein, daß auch die gegebenen Gleichungen durch gleichzeitig convergente Potenzreihen identisch zu erfüllen sind.

Die Reihen, die aber den letzten $(n + m)$ Gleichungen genügen, werden offenbar gleich. Setzt man daher

$$t_1 + t_2 + \dots + t_m = t, \quad \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_{n+m} = \xi,$$

so daß $\xi_1 = \frac{\xi}{n+m}$ wird, so reducirt sich das letzte System auf die einzige Gleichung

$$\xi = (n + m) \gamma t + (n + m) g \left(\frac{\xi}{r} \right)^2 \frac{1}{1 - \frac{\xi}{r}} = 0$$

oder

$$\xi^2 - \frac{r(n+m)\gamma t + r^2}{(n+m)g+r} \xi + \frac{r^2(n+m)\gamma t}{(n+m)g+r} = 0,$$

und weil ξ in der Umgebung der Stelle $t=0$ in eine convergente Potenzreihe entwickelt werden kann, müssen auch die $(n + m)$ Potenzreihen

$$x_1 - a_1 = \mathfrak{P}_1(t_1, t_2, \dots, t_m)$$

einen gemeinsamen Convergenzbereich besitzen, was zu zeigen war. —

Indem die Größen t_μ als lineare Functionen der Größen ξ_λ eingeführt waren, entspricht nicht allein jedem Werthesysteme aus dem gemeinsamen Convergenzbereich der gefundenen Reihen eine bestimmte Stelle (x_1) , sondern es gehört auch zu jedem dieser Werthesysteme x_1, x_2, \dots, x_{n+m} eine bestimmte Stelle (t) . Ist $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ eine Stelle des gemeinsamen Giltigkeitsbereiches der Reihen $\mathfrak{P}_1(t_1, t_2, \dots, t_m)$, welcher die Stelle $(\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \alpha'_{n+m})$ entspricht, so existiren auch $(n + m)$ convergente Reihen

$$x_\lambda - a'_\lambda = \mathfrak{P}'_\lambda(t_1, t_2, \dots, t_m | (\alpha)) \quad (\lambda = 1, 2, \dots, n + m),$$

und wenn m der neuen Reihen \mathfrak{P}'_λ die Bedingung erfüllen, daß eine der Determinanten m^{ter} Ordnung aus der Matrix

$$\left\| \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathfrak{P}'_1}{\partial t_1} & \dots & \frac{\partial \mathfrak{P}'_{n+m}}{\partial t_1} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \mathfrak{P}'_1}{\partial t_m} & \dots & \frac{\partial \mathfrak{P}'_{n+m}}{\partial t_m} \end{pmatrix} \right\|_{(\alpha)}$$

z. B. die aus den letzten m Verticalreihen gebildete nicht verschwindet, so kann man die m Größen $t_\mu - \alpha_\mu$ durch Potenzreihen in den m Größen $\xi'_{n+\mu} = x_{n+\mu} - a'_{n+\mu}$ ($\mu = 1, 2, \dots, m$) darstellen und die Substitution dieser Reihen in die n übrigen gibt n gleichzeitig convergente Potenzreihen:

$$x_\nu - a'_\nu = \mathfrak{P}_\nu(x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m} | a'_{n+1}, a'_{n+2}, \dots, a'_{n+m}) \\ (\nu = 1, 2, \dots, n). —$$

Wir wissen bereits, daß im Falle einer Gleichung

$$G(x_1, x_2, \dots, x_{n+m}) = 0,$$

$$A_{v,1}\xi_1 + A_{v,2}\xi_2 + \dots + A_{v,n+m}\xi_{n+m} + (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+m})_{v,2} + \dots = 0$$

$$(v = 2, 3, \dots, n)$$

substituirt und die Coefficienten von $\xi_2, \xi_3, \dots, \xi_{n+m}$ sucht, wobei die Glieder höherer als der ersten Dimension nicht in Betracht kommen, so ist klar, daß die in Rede stehende Determinante in den A' auch nicht verschwinden kann.

Dann aber gibt es $(n-1)$ Potenzreihen:

$$\xi_v = \mathfrak{P}'_v(\xi_{n+1}, \xi_{n+2}, \dots, \xi_{n+m}) \quad (v = 2, 3, \dots, n),$$

und wenn aus diesen alle möglichen Werthesysteme einer Umgebung der Stelle (0) zu entnehmen sind, welche den Gleichungen (α) genügen, so werden alle den ursprünglichen Gleichungen genügenden Werthesysteme einer gewissen Umgebung der Stelle $(\xi) = (0)$ zu finden sein, wenn man den hier genannten Stellen $(\xi_2, \xi_3, \dots, \xi_{n+m})$ denjenigen Werth ξ_1 zuordnet, welcher nach Substitution der $(n-1)$ Reihen \mathfrak{P}'_v für ξ_v aus der Reihe $\mathfrak{P}_1(\xi_2, \xi_3, \dots, \xi_{n+m})$ hervorgeht.

So ist durch den Schluß von $(n-1)$ auf n bewiesen, daß die den gegebenen Gleichungen genügenden Stellen der Umgebung einer ersten Stelle (a) alle aus den Potenzreihen $\mathfrak{P}_1(t_1, t_2, \dots, t_m)$ gefunden werden. —

Angenommen, daß in der Umgebung einer zweiten Stelle (b_1) des durch die Gleichungen $G_v = 0$ definirten Gebildes ein System neuer Reihen:

$$x_1 - b_1 = \mathfrak{P}'_1(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m)$$

das Gebilde darstellt, und innerhalb des gemeinsamen Convergenzgebietes dieser Reihen ein Bereich um eine Stelle $(\tau^{(0)})$ existirt, welchem nur Werthesysteme einer Umgebung der Stelle

$$x_1 = c_1, \quad x_2 = c_2, \dots, x_{n+m} = c_{n+m}$$

zugehören, die auch aus den Reihen

$$x_1 - a_1 = \mathfrak{P}_1(t_1, t_2, \dots, t_m)$$

entspringen, wenn t_1, t_2, \dots, t_m auf eine gewisse Umgebung einer Stelle $(t^{(0)})$ beschränkt wird, dann coincidiren die durch die beiden Systeme von Potenzreihen definirten Systeme von Stellen. Indem man ein solches System von Stellen ein *Element* des durch die Gleichungen $G_v = 0$ bestimmten Gebildes nennt, kann man sagen: die zwei Elemente *coincidiren* in der Umgebung der Stelle (c_1) .

Weil die Größen t_μ lineare Functionen von $x_1 - a_1$ waren:

$$t_\mu = \sum_{\lambda=1}^{n+m} A_{n+\mu,\lambda} (x_\lambda - a_\lambda) \quad (\mu = 1, 2, \dots, m),$$

die identisch in $\sum_{\lambda=1}^{n+m} A_{n+\mu,\lambda} (b_\lambda - a_\lambda + (x_\lambda - b_\lambda))$

umzuformen sind, so lehrt die Substitution der Reihen für $x_1 - b_1$, daß t_μ in Potenzreihen nach den Größen τ_μ entwickelt werden können; und da den Stellen $(t^{(0)})$ und $(\tau^{(0)})$ gleichzeitig die Stelle (c_1) zugeordnet war, haben diese Reihen die Form

$$t_\mu - t_\mu^{(0)} = \mathfrak{p}_\mu(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m | (\tau^{(0)})),$$

wo \mathfrak{p}_μ kein constantes Glied enthält. — Die Ausdrücke

$$a_1 + \mathfrak{P}_1(t_1, t_2, \dots, t_m)$$

werden mit Hilfe dieser Reihen in $b_1 + \mathfrak{P}_1(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m)$ übergehen.

Da die Größen τ_μ lineare Functionen von $x_1 - b_1$ sind, existiren auch m Potenzreihen

$$\tau_\mu - \tau_\mu^{(0)} = \mathfrak{p}'_\mu(t_1, t_2, \dots, t_m | (t^{(0)})),$$

die durch Umkehrung der früheren Reihen

$$t_\mu - t_\mu^{(0)} = \sum_{(v_\mu)=0}^{\infty} e_{v_1, v_2, \dots, v_m}^{(\mu)} (\tau_1 - \tau_1^{(0)})^{v_1} (\tau_2 - \tau_2^{(0)})^{v_2} \dots (\tau_m - \tau_m^{(0)})^{v_m}$$

zu gewinnen sein müssen, weil zu einem Werthesysteme der t nur ein bestimmtes System der τ gehören kann und umgekehrt. Dazu muß nothwendig die Determinante

$$\begin{vmatrix} e_{1,0,\dots,0}^{(1)} & \dots & e_{0,0,\dots,0,1}^{(1)} \\ \vdots & & \vdots \\ e_{1,0,\dots,0}^{(m)} & \dots & e_{0,0,\dots,0,1}^{(m)} \end{vmatrix}$$

von Null verschieden sein.

Wenn darnach zwei Elemente eines durch n Gleichungen $G_v = 0$ definirten Gebildes in der Umgebung einer Stelle (c_1) coincidiren und die Werthe c_1 für $t_\mu = \alpha_\mu$ und $\tau_\mu = \beta_\mu$ aus den Elementen entspringen, dann gibt es m Potenzreihen

$$t_\mu - \alpha_\mu = \mathfrak{p}_\mu(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m | (\beta_\mu)),$$

welche das erste Element in das zweite überführen, und das zweite ist umgekehrt durch die aus diesen Reihen hervorgehenden Reihen

$$\tau_\mu - \beta_\mu = \mathfrak{p}'_\mu(t_1, t_2, \dots, t_m | (\alpha_\mu))$$

in das erste zu transformiren.

Damit ist klar, wie man ein Element:

$$x_1 - a_1 = \mathfrak{P}_1(t_1, t_2, \dots, t_m) \quad (\mu = 1, 2, \dots, m)$$

fortzusetzen hat. Man greife aus dem gemeinsamen Convergenzbe-
reiche der Reihen \mathfrak{P}_1 eine Stelle (α_μ) heraus, setze dann anstatt t_μ
 $\alpha_\mu + (t_\mu - \alpha_\mu)$ und ordne die Reihen nach Potenzen von $t_\mu - \alpha_\mu$,
führe statt $t_\mu - \alpha_\mu$ m convergente Potenzreihen

$$\mathfrak{p}_\mu(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m | (\beta_\mu))$$

ohne constantes Glied ein, so entstehen die Reihen

$$x_1 - c_1 = \mathfrak{P}'_1(\tau_1, \tau_2, \dots \tau_m | (\beta_\mu)).$$

Setzt man schliesslich $\tau_\mu - \beta_\mu = u_\mu$, so folgt die frühere Form

$$x_1 - c_1 = \mathfrak{P}'_1(u_1, u_2, \dots u_m),$$

und dieses Element coincidirt mit dem ersten in der Umgebung von (c_1) . Die somit anstatt t_μ eingeführten Reihen

$$t_\mu = \alpha_\mu + \mathfrak{p}_\mu(u_1, u_2, \dots u_m)$$

haben aber nothwendig die Eigenthümlichkeit, dass die Determinante

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial \mathfrak{p}_1}{\partial u_1} & \frac{\partial \mathfrak{p}_1}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial \mathfrak{p}_1}{\partial u_m} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \frac{\partial \mathfrak{p}_m}{\partial u_1} & \frac{\partial \mathfrak{p}_m}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial \mathfrak{p}_m}{\partial u_m} \end{vmatrix}$$

an der Stelle $u_1 = u_2 = \dots = u_m = 0$ nicht verschwindet. —

Stellt man unabhängig von den ursprünglichen Gleichungen $G_r = 0$ als Definition eines monogenen analytischen Gebildes die Gesamtheit der durch ein Element:

$$x_\lambda - a_\lambda = \mathfrak{P}_\lambda(t_1, t_2, \dots t_m) \quad (\lambda = 1, 2, \dots n + m)$$

und seiner Fortsetzungen gegebenen Werthesysteme auf, so hat man zu zeigen, dass dieses Gebilde das durch die n Gleichungen definirte umfasst. Nun wissen wir bereits, dass überall, wo eine der Determinanten aus der Matrix

$$\left\| \begin{array}{ccc} \frac{\partial G_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial G_1}{\partial x_{n+m}} \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ \frac{\partial G_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial G_n}{\partial x_{n+m}} \end{array} \right\|$$

nicht verschwindet, n der Grössen x durch Potenzreihen in den übrigen m Variabeln und alle Grössen x durch Potenzreihen in m neuen Variabeln darstellbar sind. Die Fortsetzungen dieser n Reihen sind aber auch Fortsetzungen des Elementes, das nach der Anzahl der unabhängigen Variabeln t eines m^{ter} Stufe in dem $2(n + m)$ fach ausgedehnten Gebiete der $(n + m)$ Grössen x_λ genannt wird.

In der That: wenn die n Reihen

$$x_r - a_r = \mathfrak{P}_r(x_{n+1}, x_{n+2}, \dots x_{n+m} | (a_{n+\mu}))$$

und das Element

$$x_\lambda - a_\lambda = \mathfrak{P}_\lambda(t_1, t_2, \dots t_m)$$

in einem Bereiche um die Stelle (a) dieselben Werthesysteme (x) liefern, so werden die aus der Fortsetzung:

$$x_1 - c_1 = \mathfrak{P}'_1(u_1, u_2, \dots u_m)$$

abzuleitenden Potenzreihen

$$x_\nu - c_\nu = \mathfrak{P}'_\nu(x_{n+1}, x_{n+2}, \dots x_{n+m} | (c_{n+\mu}))$$

Fortsetzungen der ersten n Reihen sein, denn wenn das erste und zweite Element in der Umgebung von (c_2) coincidiren, so stimmen auch die n Reihen \mathfrak{P}_ν und \mathfrak{P}'_ν für jede Stelle eines gewissen Bereiches um die Stelle (c) überein und umgekehrt.

Das analytische Gebilde m^{ter} Stufe in dem Gebiete von $m+n$ Größen enthält aber mehr Stellen als das durch n primitive Reihen

$$x_\nu - a_\nu = \mathfrak{P}_\nu(x_{n+1}, \dots x_{n+m} | (a_{n+\mu})) \quad (\nu = 1, 2, \dots n)$$

definierte System analytischer Functionen, denn das Gebilde besitzt auch dort ein Element, wo die Determinante

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial x_1}, & \dots & \frac{\partial G_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial G_n}{\partial x_1}, & \dots & \frac{\partial G_n}{\partial x_n} \end{vmatrix}$$

verschwindet, sofern nur eine andere der Determinanten aus der oben genannten Matrix von Null verschieden ist.

Darum erheben wir das analytische Gebilde über die analytische Function des früheren Sinnes und treffen für die analytische Function folgende Festsetzung: Zu den Werthen ($c_{n+\mu}$) der unabhängigen Variablen $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots x_{n+m}$ gehören bestimmte Werthe $c_1, c_2, \dots c_n$ der durch ein System primitiver Elemente

$$x_\nu - a_\nu = \mathfrak{P}_\nu(x_{n+1}, \dots x_{n+m} | a_{n+1}, \dots a_{n+m})$$

definierten analytischen Functionen, wenn in dem Gebiete der $(n+m)$ unabhängigen Größen x_λ ein Gebilde m^{ter} Stufe mit einem in der Umgebung der Stelle (c_2) giltigen Elemente

$$x_1 - c_1 = \mathfrak{P}'_1(u_1, u_2, \dots u_m)$$

existirt, welches in jeder Umgebung der Stelle (0) unendlich viele Werthesysteme (x) mit der Häufungsstelle (c_2) definirt, die auch aus n simultanen Elementen unseres Functionensystems hervorgehen. Darnach gehört z. B. die Stelle (∞) zu dem Gültigkeitsbereiche von n analytischen Functionen, und sie nehmen dort den Werth ∞ an, wenn man ein Element der Form:

$$\frac{1}{x_\lambda} = \mathfrak{P}_\lambda(v_1, v_2, \dots v_m) \quad (\lambda = 1, 2, \dots n+m)$$

angeben kann, in dessen Convergenzbereiche eine Stelle ($v^{(0)}$) der Beschaffenheit liegt, daß in der Umgebung der zugehörigen Stelle ($x^{(0)}$) dieses Element mit den simultanen Fortsetzungen unserer primitiven Reihen übereinstimmt.

So haben wir an der Hand der Aufgabe, die durch algebraische Gleichungen definirten Größen als analytische Functionen der unabhängigen Variablen zu erkennen, den Functionsbegriff und den eines Systems von Functionen zu dem Begriffe des analytischen Gebildes erweitert, und wenn dieses durch ein Element

$$x_\lambda - a_\lambda = \mathfrak{P}_\lambda(t_1, t_2, \dots t_m) \quad (\lambda = 1, 2, \dots n + m)$$

definirt ist, so sind die Potenzreihen einzig und allein der Beschränkung zu unterwerfen, daß eine der Determinanten aus der Matrix

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial \mathfrak{P}_1}{\partial t_1}, & \dots & \frac{\partial \mathfrak{P}_{n+m}}{\partial t_1} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial \mathfrak{P}_1}{\partial t_m}, & \dots & \frac{\partial \mathfrak{P}_{n+m}}{\partial t_m} \end{vmatrix}$$

nicht identisch verschwindet, denn andernfalls könnte zwischen den Größen x_λ kein Zusammenhang bestehen. Wäre z. B. die aus den letzten m Verticalreihen gebildete Determinante identisch Null, so könnte man niemals $t_1, t_2, \dots t_m$ nach Potenzreihen von $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots x_{n+m}$ entwickeln; und wenn die Größen t niemals durch Potenzreihen in m der Größen x darzustellen sind, gibt es auch keine Elemente der Form:

$$x_\lambda - a_\lambda = \mathfrak{P}_\lambda^{(1)}(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots x^{(m)} | (a^{(\mu)}),$$

wo unter den $x^{(\mu)}$ und $a^{(\mu)}$ Größen x_λ und a_μ zu verstehen sind, d. h. es bestünde zwischen den Größen x_λ kein Zusammenhang.

Diejenigen Stellen, wo alle Determinanten der genannten Art verschwinden, sind die *singulären Stellen* des Gebildes m^{ter} Stufe. Im Falle das Gebilde durch eine algebraische Gleichung $G(y, x) = 0$ mit rationalen Coefficienten definirt ist, sind diese singulären Stellen diejenigen, wo man zur Darstellung des Gebildes mehrere Elemente oder Functionenpaare bedarf.

Wir kommen in dem letzten Capitel noch einmal auf das durch eine irreductible algebraische Gleichung definirte Gebilde m^{ter} Stufe in dem Gebiete von $m + 1$ Größen zurück, um auch der hier unberücksichtigt gebliebenen Frage nach der Monogenität eines solchen Gebildes unsere Aufmerksamkeit zuzuwenden.

II. Abschnitt.

Durch Differentialgleichungen definierte analytische Functionen.

§ 43. Totale Differentialgleichungen.

Die eingeführten analytischen Functionen besitzen an allen nicht singulären Stellen Differentialquotienten jeder Ordnung nach den unabhängigen Variablen. Wenn aber (a_1) eine singuläre Stelle ist, in deren Umgebung wohl ein Element

$$x_1 - a_1 = \mathfrak{P}_1(t_1, t_2, \dots, t_m) \quad (\lambda = 1, 2 \dots n + m)$$

aufzustellen ist, auf daß

$$\frac{\partial x_\nu}{\partial t_\mu} \quad \text{und} \quad \frac{\partial x_{n+\mu}}{\partial t_\mu}$$

existirt, kann man aber aus den letzten m Potenzreihen t_1, t_2, \dots, t_m nicht nach Potenzen von $(x_{n+\mu} - a_{n+\mu})$ ($\mu = 1, 2 \dots m$) entwickeln, so wird der Differentialquotient

$$\frac{\partial x_\nu}{\partial x_{n+\mu}} = \frac{\partial x_\nu}{\partial x_\mu} \cdot \frac{\partial t_\mu}{\partial x_{n+\mu}}$$

an der Stelle (a_1) nicht durch eine Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m} | (a_{n+\mu}))$$

darstellbar sein; d. h. der Differentialquotient der analytischen Function x_ν von $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m}$ nach $x_{n+\mu}$ wird an der Stelle (a_1) nicht von regulärem Verhalten sein.

Soviel steht aber fest, daß wir die Ableitungen unserer Functionen als vollständig definierte analytische Functionen in Rechnung zu ziehen haben. Wenn die Ableitungen mit der Function gegeben sind, kann man fragen, ob eine vorgelegte analytische Function die Ableitung einer gleichartigen Function sein kann, und allgemeiner muß man untersuchen, ob man n analytische Functionen x_ν von m unabhängigen Variablen so bestimmen kann, daß zwischen den unabhängigen Variablen $x_{n+\mu}$ ($\mu = 1, 2 \dots m$) und den Größen x_ν ($\nu = 1, 2 \dots n$) und einer nach den $x_{n+\mu}$ genommenen bestimmten Anzahl von Ableitungen verschiedener Ordnung derselben eine Reihe von Beziehungen besteht, die durch die arithmetischen Operationen mit den in Rede stehenden Größen dargestellt sind.

Gibt es Functionen dieser Art, so heißen sie *Integralfunctionen*. Wir nehmen zunächst an, daß nur eine unabhängige Variable x in Betracht komme. Wir nennen die n von x abhängigen Größen x_1, x_2, \dots, x_n und setzen fest, daß zwischen diesen Größen x selbst

und den ersten m_1 Ableitungen von x_1 nach x , den m_2 ersten Ableitungen von x_2 nach x , und endlich zwischen den m_n ersten Ableitungen von x_n nach x n in den höchsten Differentialquotienten algebraische Gleichungen bestehen:

$$F_v \left(x, x_1, x_2, \dots, x_n, \frac{dx_1}{dx}, \frac{d^2 x_1}{dx^2}, \dots, \frac{d^{m_1} x_1}{dx^{m_1}}, \dots \right. \\ \left. \dots, \frac{dx_n}{dx}, \frac{d^2 x_n}{dx^2}, \dots, \frac{d^{m_n} x_n}{dx^{m_n}} \right) = 0,$$

deren Coefficienten rationale Functionen der übrigen Größen sind.

Führen wir an Stelle der ersten $(m_v - 1)$ Ableitungen:

$$\frac{dx_v}{dx}, \frac{d^2 x_v}{dx^2}, \dots, \frac{d^{m_v-1} x_v}{dx^{m_v-1}}$$

die neuen Größen:

$$x_v^{(2)}, x_v^{(3)} = \frac{dx_v^{(2)}}{dx}, \dots, x_v^{(m_v)} = \frac{d^{m_v-1} x_v}{dx}$$

ein und schreiben für x_v $x_v^{(1)}$, so erhalten wir:

$$n + \sum_{v=1}^n (m_v - 1) = \sum_{v=1}^n m_v = M$$

Differentialgleichungen erster Ordnung:

$$F_v \left(x; x_1^{(1)}, x_1^{(2)}, \dots, x_1^{(m_1)}, \frac{dx_1^{(m_1)}}{dx}; \dots, x_n^{(1)}, x_n^{(2)}, \dots, x_n^{(m_n)}, \frac{dx_n^{(m_n)}}{dx} \right) = 0 \\ x_v^{(2)} - \frac{dx_v^{(1)}}{dx} = 0, x_v^{(3)} - \frac{dx_v^{(2)}}{dx} = 0, \dots, x_v^{(m_v)} - \frac{dx_v^{(m_v-1)}}{dx} = 0 \\ (\nu = 1, 2 \dots n)$$

mit M abhängigen Größen $x_v^{(1)}, x_v^{(2)}, \dots, x_v^{(m_v)}$ ($\nu = 1, 2 \dots n$).

Dieses System ersetzen wir allgemeiner durch ein anderes gleicher Gestalt:

$$F_v \left(x; x_1, x_2, \dots, x_n, \frac{dx_1}{dx}, \frac{dx_2}{dx}, \dots, \frac{dx_n}{dx} \right) = 0 \quad (\nu = 1, 2 \dots n).$$

Wenn die ursprünglichen Gleichungen nicht alle die höchsten in dem Systeme vorkommenden Differentialquotienten enthalten sollten, so sind sie nicht unmittelbar auf diese Form zu bringen, doch wird man mit Hilfe von Differentiationen der gegebenen Gleichungen stets ein System unserer Art bilden können. Hierauf hat man aber zu zeigen, daß die Functionen, welche diesem Systeme genügen, auch das erste erfüllen und man wird ausfindig machen müssen, wie sich aus den durch das neue System bestimmten Functionen diejenigen ableiten lassen, welche

den gegebenen Gleichungen genügen. Diese Aufgaben lassen wir hier aufser Acht. —

Wir setzen voraus, dafs man aus den neuen Gleichungen $F_v = 0$ bei der Elimination von $n - 1$ Differentialquotienten niemals eine Gleichung in x und den Gröfsen x_1, x_2, \dots, x_n allein ableiten könne, sondern dafs das System der Eliminationsresultate die Form erhält:

$$G_v \left(x; x_1, x_2, \dots, x_n, \frac{dx_v}{dx} \right) = 0,$$

denn wenn einmal eine Gleichung $G_v(x, x_1, \dots, x_n) = 0$ hervorginge, so könnte man diese zur Reduction des Gleichungssystems $F_v = 0$ auf ein anderes benützen, in welchem die Anzahl von Differentialgleichungen und Variablen um Eins vermindert ist.

Das System $G_v = 0$, dem offenbar alle Lösungen der Differentialgleichungen $F_v = 0$ genügen, wollen wir durch ein oder mehrere *Normalgleichungssysteme* der schon oben genannten Art ersetzen.

Bezeichnet man die Differentialquotienten $\frac{dx_v}{dx}$ mit y_v und führt eine neue Gröfse x_{n+1} ein, die durch den Ausdruck

$$a_1 y_1 + a_2 y_2 + \dots + a_n y_n$$

mit n willkürlichen Constanten definirt sei, so kann man zunächst eine algebraische Gleichung ableiten, welcher x_{n+1} genügt. Ist die Function $G_v(x, x_1, x_2, \dots, x_n, y_v)$ in y_v vom m_v ten Grade und sind die Lösungen der Gleichung $G_v = 0$

$$y_v^{(1)}, y_v^{(2)}, \dots, y_v^{(m_v)},$$

so ist das Product

$$\Phi(x_{n+1}) = \prod (x_{n+1} - (a_1 y_1^{(\mu_1)} + a_2 y_2^{(\mu_2)} + \dots + a_n y_n^{(\mu_n)})) \quad (\alpha)$$

über alle Factoren $x_{n+1} - (a_1 y_1^{(\mu_1)} + \dots + a_n y_n^{(\mu_n)})$, die bei den verschiedenen Combinationen der Lösungen $y_v^{(m_v)}$ hervorgehen, eine ganze rationale Function von x_{n+1} . Die neue Gröfse x_{n+1} genügt der Gleichung $\Phi(x_{n+1}) = 0$.

Sind die Gleichungen $F_v = 0$ und $G_v = 0$ in den Gröfsen x, x_1, x_2, \dots, x_n rational, so werden die Coefficienten der verschiedenen Potenzen von x_{n+1} rationale Functionen der Coefficienten der Gleichungen $G_v = 0$ und somit rational in $x, x_1, x_2, \dots, x_n, a_1, a_2, \dots, a_n$ sein. Zerlegt man hierauf das Product in seine irreductiblen Factoren:

$$H(x_{n+1}; x, x_1, \dots, x_n, a_1, a_2, \dots, a_n),$$

so sind deren Nullstellen

$$x_{n+1}^{(i)} = a_1 y_1^{(i)} + a_2 y_2^{(i)} + \dots + a_n y_n^{(i)}.$$

Genügt ein System von Gröfsen $y_v^{(i)}$ ($v = 1, 2, \dots, n$) aus einer Wurzel der Gleichung $H = 0$ gleichzeitig den Gleichungen $G_v = 0$ und $F_v = 0$,

so wird wegen der vorausgesetzten Irreductibilität der Gleichung $H = 0$ jedes in einer weiteren Lösung

$$x_{n+1}^{(j)} = a_1 y_1^{(j)} + a_2 y_2^{(j)} + \dots + a_n y_n^{(j)}$$

auf tretende System von Lösungen der Gleichungen $G_v = 0$ ebenfalls die ursprünglichen Gleichungen erfüllen, d. h. die Beziehung $H = 0$, welche zwischen n Lösungen $y_v^{(i)}$ der Gleichungen $F_v = 0$ besteht, bleibt erhalten, wenn man das System von n Functionen $y_v^{(i)}$ auf gleichem Wege fortsetzt.

Damit leuchtet ein, daß aus der irreductiblen Gleichung $H = 0$ ein System zusammengehöriger Werthe für y_1, y_2, \dots, y_n entspringt, und jedenfalls lassen sich die Lösungen der Gleichungen $G_v = 0$ in Gruppen ordnen, denen je ein irreductibler Factor entspricht.

Setzt man

$$H(x_{n+1}) = \prod_{i=1}^k (x_{n+1} - (a_1 y_1^{(i)} + a_2 y_2^{(i)} + \dots + a_n y_n^{(i)})),$$

und bildet

$$-\frac{\partial H}{\partial a_v} = \sum_{i=1}^k \frac{y_v^{(i)} H}{x_{n+1} - (a_1 y_1^{(i)} + a_2 y_2^{(i)} + \dots + a_n y_n^{(i)})}$$

$$\frac{\partial H}{\partial x_{n+1}} = \sum_{i=1}^k \frac{H}{x_{n+1} - (a_1 y_1^{(i)} + a_2 y_2^{(i)} + \dots + a_n y_n^{(i)})},$$

und sind die willkürlichen Constanten a_v so gewählt, daß $\frac{\partial H}{\partial x_{n+1}}$ für keine der Wurzeln $x_{n+1}^{(i)}$ verschwindet, so wird

$$-\left(\frac{\frac{\partial H}{\partial a_v}}{\frac{\partial H}{\partial x_{n+1}}} \right) = y_v^{(i)},$$

d. h. jeder Lösung der Gleichung $H(x_{n+1}) = 0$ entspricht ein Werthesystem:

$$\frac{dx_v}{dx} = - \frac{\frac{\partial H}{\partial a_v}}{\frac{\partial H}{\partial x_{n+1}}} = \frac{H_v(x, x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1})}{\frac{\partial H(x, x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1})}{\partial x_{n+1}}},$$

und darum sind die gegebenen Gleichungen $G_v = 0$ durch ebensoviele Gleichungssysteme der Form

$$H = 0 \quad \text{und} \quad \frac{dx_v}{dx} = \frac{H_v}{\frac{\partial H}{\partial x_{n+1}}} \quad (v = 1, 2, \dots, n)$$

zu ersetzen, als irreductible Factoren in dem ursprünglichem Producte (α) enthalten sind.

Die willkürlichen Constanten a sind hier wieder verschwunden, weil wir ihnen solche bestimmte Werthe beigelegt dachten, daß die Discriminante von H nicht identisch verschwindet.

Die genannte *canonische Form* eines Systems von n Differentialgleichungen mit n abhängigen und einer unabhängigen Variablen läßt sich noch dahin modificiren, daß man die hinzugetretene irreductible algebraische Gleichung $H=0$ für die Hilfsgröße x_{n+1} durch eine $(n+1)^{\text{te}}$ Differentialgleichung ersetzt. Durch Differentiation der Gleichung $H=0$ nach x folgt:

$$\frac{dx_{n+1}}{dx} = - \frac{\frac{\partial H}{\partial x} + \sum_{\nu=1}^n \frac{\partial H}{\partial x_{\nu}} \cdot \frac{dx_{\nu}}{dx}}{\frac{\partial H}{\partial x_{n+1}}} = \frac{H_{n+1}(x, x_1, \dots, x_{n+1})}{\frac{\partial H}{\partial x_{n+1}}},$$

und umgekehrt muß mit den $(n+1)$ Differentialgleichungen:

$$\frac{dx_{\nu}}{dx} = - \frac{H_{\nu}}{\frac{\partial H}{\partial x_{n+1}}} \quad (\nu = 1, 2, \dots, n+1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad \text{oder} \quad H = \text{const.}$$

sein. Wir werden gleich sehen, daß wir dieser Constanten den Werth Null beizulegen haben.

Der Vortheil des neuen Systems von Differentialgleichungen gegenüber dem canonischen beruht darin, daß in demselben die Variablen Größen x_1, x_2, \dots, x_{n+1} gleichberechtigt erscheinen.

Indem wir x durch x_0 bezeichnen und eine weitere Variable t durch die Gleichung

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x_{n+1}} = H_0$$

eingeführen, erhalten wir das System von $(n+2)$ Differentialgleichungen:

$$\frac{dx_{\nu}}{dt} = H_{\nu}(x_0, x_1, \dots, x_{n+1}) \quad (\nu = 0, 1, 2, \dots, n+1),$$

wo die Function bis auf H_{n+1} ganze rationale Functionen von x_{n+1} sind, welche die Variable t nicht enthalten.

Es handelt sich nun um den Beweis, daß man das canonische System identisch erfüllen kann, indem man x_1, x_2, \dots, x_{n+1} in der Umgebung einer Stelle $x=c$ durch convergente Potenzreihen darstellt, die für $x=c$ die Werthe c_1, c_2, \dots, c_{n+1} annehmen, wo c_1, c_2, \dots, c_n einzig an die Bedingung geknüpft sind, daß der diesen Werthen zufolge der Gleichung $H(x_{n+1})=0$ zugeordnete Werth $x_{n+1}=c_{n+1}$ keine vielfache Wurzel ist, da dann $\left(\frac{\partial H}{\partial x_{n+1}}\right)$ verschwände.

Bei einer derartigen Wahl der willkürlichen Constanten ist offenbar in der früheren Gleichung $H = \text{const.}$ die Constante gleich Null zu setzen.

Will man beweisen, daß das dritte System von Differentialgleichungen formell durch Potenzreihen nach der Variablen t zu erfüllen ist, so ordne man $t = 0$ solche Anfangswerthe $x_0, x_1 \dots x_{n+1}$ zu, daß die Functionen H , nicht verschwinden. Andernfalls würden alle Größen x , Constanten.

Die hier genannte Forderung betreffs der Constanten ist die natürliche Erweiterung der früheren, denn die Anfangswerthe, welche die Gleichungen

$$H = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial H}{\partial x_{n+1}} = 0$$

erfüllen, machen vor Allem die Functionen

$$H_v = - \frac{\partial H}{\partial a_v} = \sum_{i=1}^k \frac{y_v^{(i)} H}{x_{n+1} - (a_1 y_1^{(i)} + a_2 y_2^{(i)} + \dots + a_n y_n^{(i)})}$$

zu Null, und die Function:

$$H_{n+1} = - \left(\frac{\partial H}{\partial x} + \sum_{v=1}^n \frac{\partial x_v}{\partial x} \right) = - \frac{\frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x_{n+1}} - \sum_{v=1}^n \frac{\partial H}{\partial x_v} \frac{\partial H}{\partial a_v}}{\frac{\partial H}{\partial x_{n+1}}}$$

scheint wohl unbestimmt zu sein, da ihr Werth die Form $\frac{0}{0}$ erhält, doch sie verschwindet ebenfalls für die Anfangswerthe, weil

$$dH = 0 = \frac{\partial H}{\partial x} dx + \sum_{v=1}^n \frac{\partial H}{\partial x_v} \frac{dx_v}{dx} dx + \frac{\partial H}{\partial x_{n+1}} \frac{dx_{n+1}}{dx} dx$$

ist. *)

Nach dieser Ableitung der verschiedenen Formen eines Systems von Differentialgleichungen mit einer unabhängigen Variablen gehen wir auf die dritte Form ein, setzen aber voraus, daß in den n Gleichungen

$$\frac{dx_v}{dt} = F_v(x_1, x_2, \dots x_n) \quad (v = 1, 2 \dots n)$$

F , ganz allgemein analytische Functionen der n Variablen seien, deren Stetigkeitsbereich wenigstens theilweise zusammenfällt.

Bezeichnet (c) eine Stelle dieses gemeinsamen Bereiches, so existirt

*) Aus diesem Umstande kann man schließen, daß der angegebene Zähler in dem Ausdrucke für H_{n+1} durch $\frac{\partial H}{\partial x_{n+1}}$ als Function von x_{n+1} theilbar ist und überhaupt theilbar sein muß, wenn die Coefficienten in den Gleichungen $G_v = 0$ rationale Functionen sind.

eine Umgebung derselben, in welcher jede der Functionen F_v durch eine Potenzreihe

$$\mathfrak{P}_v(x_1, x_2, \dots, x_n | (c))$$

dargestellt wird. Es soll aber die Stelle (c) nicht gerade eine solche sein, wo diese definirenden Elemente der analytischen Functionen alle den Werth Null annehmen.

Bildet man aus den gegebenen Gleichungen die höheren Ableitungen:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_v}{dt^2} &= \sum_{\mu=1}^n \frac{\partial F_v}{\partial x_\mu} \frac{dx_\mu}{dt} = \sum_{\mu=1}^n \frac{\partial F_v}{\partial x_\mu} F_\mu = F_v^{(2)} \\ \frac{d^3 x_v}{dt^3} &= \sum_{\mu=1}^n \frac{\partial F_v^{(2)}}{\partial x_\mu} \frac{dx_\mu}{dt} = \sum_{\mu=1}^n \frac{\partial F_v^{(2)}}{\partial x_\mu} F_\mu = F_v^{(3)} \\ &\dots \dots \dots \\ \frac{d^x x_v}{dt^x} &= F_v^{(x)} \end{aligned}$$

und beachtet, daß für die analytische Function x_v einer Variablen t — sofern $t = 0$ der Werth $x_v = c_v$ zugeordnet wird — die formelle Entwicklung

$$x_v - c_v = \sum_{x=1}^{\infty} \left(\frac{d^x x_v}{dt^x} \right) \frac{t^x}{x!}$$

gilt, so erhalten wir in unserem Falle die den Differentialgleichungen formell genügenden Reihen:

$$x_v - c_v = \sum_{x=1}^{\infty} F_v^{(x)}(c_1, c_2, \dots, c_n) \cdot \frac{t^x}{x!} \quad (v = 1, 2, \dots, n),$$

denen erst eine analytische Bedeutung zuzuschreiben ist, wenn gezeigt wird, daß sie unter den für F_v vorausgesetzten Bedingungen einen gemeinsamen Convergenzbereich besitzen.

Man sieht leicht, daß die aufgestellten Reihen unsere Differentialgleichungen identisch erfüllen, denn wenn man in

$$\begin{aligned} F_v(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \mathfrak{P}_v(x_1, x_2, \dots, x_n | (c)) = \\ &= \sum_{(\mu_v)=0}^{\infty} \left(\frac{\partial^{\mu_1+\mu_2+\dots+\mu_n} F_v}{\partial x_1^{\mu_1} \partial x_2^{\mu_2} \dots \partial x_n^{\mu_n}} \right) \frac{(x_1 - c_1)^{\mu_1}}{\mu_1!} \frac{(x_2 - c_2)^{\mu_2}}{\mu_2!} \dots \frac{(x_n - c_n)^{\mu_n}}{\mu_n!} \end{aligned}$$

die gewonnenen Reihen substituirt, so entsteht gerade die Reihe:

$$\begin{aligned} F_v^{(1)}(c_1, c_2, \dots, c_n) + F_v^{(2)}(c_1, c_2, \dots, c_n) \frac{t}{1} + F_v^{(3)}(c_1, c_2, \dots, c_n) \frac{t^2}{2!} + \dots \\ = (F_v^{(1)}) + \left(\sum_{\mu=1}^n \frac{\partial F_v^{(1)}}{\partial x_\mu} F_\mu^{(1)} \right) \cdot \frac{t}{1} + \\ + \left(\sum_{\mu, \mu'} \frac{\partial^2 F_v^{(1)}}{\partial x_\mu \partial x_{\mu'}} F_\mu^{(1)} F_{\mu'}^{(1)} + \frac{\partial F_v^{(1)}}{\partial x_\mu} \frac{\partial F_\mu^{(1)}}{\partial x_{\mu'}} F_\mu^{(1)} \right) \frac{t^2}{2!} + \dots = \frac{dx_v}{dt}. \end{aligned}$$

Die Coefficienten $F_v^{(n)}$ sind aus den gegebenen Functionen F_v nur durch Addition und Multiplication entstanden, ob sie deshalb auch durch convergente Potenzreihen darzustellen sind, müssen wir erst untersuchen.

Convergiren die Reihen für $F_v(x_1, x_2, \dots x_n)$ innerhalb des durch die Bedingungen:

$$|\xi_v| = |x_v - c_v| < R$$

definirten Bereiches und ist die obere Grenze der Werthe $|F_v|$ für alle Werthesysteme $x_1, x_2 \dots x_n$, die aus den Gleichungen

$$|\xi_v| = |x_v - c_v| = r < R$$

hervorgehen, etwa gleich g_v , so ist der absolute Betrag jedes Coefficienten der Reihe \mathfrak{P}_v gleich oder kleiner als der entsprechende Coefficient der Reihe für

$$\frac{g_v}{\left(1 - \frac{\xi_1}{r}\right) \left(1 - \frac{\xi_2}{r}\right) \dots \left(1 - \frac{\xi_n}{r}\right)}.$$

Nehmen wir an, daß die der Stelle $t=0$ zugeordneten Anfangswerthe für $x_1, x_2, \dots x_n$ alle Null sind, was durch die linearen Substitutionen $x_v - c_v = \xi_v$ stets zu erreichen ist, so vergleichen wir die Reihe $\mathfrak{P}_v(x_1, x_2, \dots x_n)$ für F_v mit der für

$$\frac{g_v}{\left(1 - \frac{x_1}{r}\right) \left(1 - \frac{x_2}{r}\right) \dots \left(1 - \frac{x_n}{r}\right)}.$$

Beachten wir, daß

$$\prod_{v=1}^n \left(1 - \frac{x_v}{r}\right) > 1 - \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{r},$$

so werden die Coefficienten der für den Ausdruck $g_v \frac{1}{1 - \frac{\sum x_v}{r}}$ giltigen

Reihe größer als die der Reihen $\mathfrak{P}_v(x_1, x_2 \dots x_n)$. Wenn deshalb aus den neuen Differentialgleichungen

$$\frac{dx_v}{dt} = \frac{g_v}{1 - \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{r}} \quad (v = 1, 2 \dots n)$$

in der Umgebung der Stelle $t=0$; $x_1=x_2=\dots=x_n=0$ n Functionenelemente hervorgehen, die einen gemeinsamen Convergenzbereich besitzen, so wird das umso mehr für die früheren Differentialgleichungen gelten.

Ist g der größte Werth unter den g_v , so wird das System von Differentialgleichungen

$$\frac{dx_v}{dt} = \frac{g}{1 - \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{r}}$$

umsomehr zu dem genannten Schlusse geeignet sein. Leitet man die diesem System genügenden Potenzreihen für x_1, x_2, \dots, x_n ab, indem man

$$\frac{d^x x}{dt^x} = 1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2x-3) \cdot \left(\frac{g}{r}\right)^{x-1} \frac{g}{\left(1 - \frac{\sum x_v}{r}\right)^{2x-1}}$$

und

$$\left(\frac{d^x x}{dt^x}\right) = 1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2x-3) \cdot g \left(\frac{g}{r}\right)^{x-1}$$

bildet, so folgt n mal dieselbe Reihe

$$x_v = \sum_{x=1}^{\infty} g \left(\frac{g}{r}\right)^{x-1} \frac{(2x-2)!}{2^{x-1}(x-1)! x!} t^x,$$

doch weil der Quotient der Coefficienten von t^x und t^{x+1} , nämlich

$$\frac{r}{g} \frac{x+1}{2x-1},$$

größer bleibt als $\frac{r}{2g}$, so convergiren die gefundenen Reihen in dem Bereiche, wo

$$|t| < \frac{r}{2g},$$

und dieser Bereich ist darum, weil r von Null verschieden und g eine endliche angebbare Gröfse ist, nicht kleiner als jeder beliebig kleine Bereich.

Umsomehr müssen nun die früheren Reihen

$$x_v = \sum_{x=1}^{\infty} F_v^{(1)}(0, 0 \dots 0) \cdot \frac{t^x}{x!}$$

oder

$$x_v - c_v = \sum_{x=1}^{\infty} F_v^{(1)}(c_1, c_2, \dots, c_n) \cdot \frac{t^x}{x!}$$

einen gemeinsamen Convergencebereich besitzen. Wie groß dieser Bereich ist, ist für unsere Untersuchungen ganz gleichgiltig, denn wir wissen, daß die simultanen Fortsetzungen der gefundenen Elemente in derselben Beziehung zu einander stehen wie die primitiven, d. h. den Differentialgleichungen genügen.

Ist neben n ersten Elementen ein zweites System

$$x_v - c_v = \sum_{x=1}^{\infty} F_v^{(1)}(C_1, C_2, \dots, C_n) \cdot \frac{t^x}{x!}$$

gegeben, welches denselben Differentialgleichungen genügt, und läßt sich in dem gemeinsamen Convergencebereiche dieser Reihen eine Stelle

($\tau^{(0)}$) angeben, in deren Umgebung das neue Functionensystem dieselben Werthe gibt wie das erste in der Umgebung einer Stelle $t^{(0)}$ ihres gemeinsamen Convergenzbereiches, so coincidiren daselbst die beiden Systeme von Potenzreihen; sie gehören demselben durch die Differentialgleichungen definirten analytischen Gebilde erster Stufe in dem Gebiete von $(n + 1)$ Gröfsen an.

Durch diese Untersuchungen ist klar geworden, dafs die in Rede stehenden Differentialgleichungen wirklich wieder analytische Functionen definiren und man kann ebenso wie bei den durch algebraische Gleichungen definirten Gröfsen beweisen, dafs sie ausschliesslich analytische Functionen bestimmen, d. h. dafs alle Gröfsen x_v , welche die Differentialgleichungen erfüllen, durch Reihen der oben bestimmten Art auszudrücken sind.

Um diese Reihen zu finden, kann man sich auch der Methode der unbestimmten Coefficienten bedienen. Man setze für x_v — c_v Potenzreihen mit unbestimmten Coefficienten

$$x_v - c_v = \sum_{x=1}^{\infty} a_x^{(v)} t^x$$

in die gegebenen Differentialgleichungen ein, entwickle die Substitutionsresultate nach Potenzen von t und vergleiche die Coefficienten gleichnamiger Glieder in t . Bestimmt man die unbestimmten Coefficienten so, dafs die Differentialgleichungen erfüllt sind, so kann man auch wieder zeigen, dafs sie einen gemeinsamen Convergenzbereich aufweisen.

§ 44. Partielle Differentialgleichungen.

Den eben bezeichneten Weg wollen wir einschlagen, wenn ein System von n algebraischen Differentialgleichungen vorgelegt ist, in welchen die n zu bestimmenden Functionen

$$x_1, x_2, \dots x_n$$

nicht bloss von einer sondern von $m + 1$ von einander unabhängigen Variablen

$$t_0, t_1, \dots t_m$$

abhängen.

Die in den Differentialgleichungen auftretenden partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial^{\alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_m} x_v}{\partial t_0^{\alpha_0} \partial t_1^{\alpha_1} \dots \partial t_m^{\alpha_m}} \quad (v = 1, 2 \dots n)$$

seien höchstens von den Ordnungen m_v ($v = 1, 2 \dots n$), so dafs

$$\alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq m_v$$

ist und wir setzen voraus, daß die Ableitungen höchster Ordnung nach einer der Variablen, z. B.

$$\frac{\partial^{m_1} x_1}{\partial t_0^{m_1}}, \frac{\partial^{m_2} x_2}{\partial t_0^{m_2}}, \dots, \frac{\partial^{m_n} x_n}{\partial t_0^{m_n}}$$

wirklich in den Gleichungen vorkommen und diese nach den genannten Ableitungen auch lösbar seien.

Führt man dann wieder eine Hilfsfunction

$$x_0 = a_0 \frac{\partial^{m_1} x_1}{\partial t_0^{m_1}} + \dots + a_n \frac{\partial^{m_n} x_n}{\partial t_0^{m_n}}$$

ein, so genügt dieselbe einer algebraischen Gleichung $\Phi(x_0) = 0$ und wenn $H_0(x_0)$ ein irreductibler Factor von $\Phi(x_0)$ ist, so kann man die gegebenen Differentialgleichungen wieder durch canonische Systeme der Form:

$$H_0(x_0) = 0$$

$$\frac{\partial^{m_\nu} x_\nu}{\partial t_0^{m_\nu}} - \frac{H_\nu}{\frac{\partial H_0}{\partial x_0}} = 0 \quad (\nu = 1, 2 \dots n)$$

ersetzen, worin die Function H_ν , $\frac{\partial H_0}{\partial x_0}$ ganze rationale Functionen der Variablen t_0, t_1, \dots, t_m und derjenigen Ableitungen:

$$\frac{\partial^{\alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_m} x_\nu}{\partial t_0^{\alpha_0} \partial t_1^{\alpha_1} \dots \partial t_m^{\alpha_m}} = x_\nu; \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$$

sind, in welchen

$$\alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq m_\nu, \alpha_0 < m_\nu$$

ist.

Es sollen nun $(m+1)$ Potenzreihen

$$x_\nu = \sum_{(\alpha)=0}^{\infty} a_{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m}^{(\nu)} \frac{(t_0 - c_0)^{\alpha_0}}{\alpha_0!} \frac{(t_1 - c_1)^{\alpha_1}}{\alpha_1!} \dots \frac{(t_m - c_m)^{\alpha_m}}{\alpha_m!}$$

$$= \mathfrak{P}_\nu(t_0, t_1, \dots, t_m | (c)) = \sum_{\alpha_0=0}^{\infty} \mathfrak{P}_\nu^{(\alpha_0)} \frac{(t_0 - c_0)^{\alpha_0}}{\alpha_0!}$$

$$(\nu = 0, 1, 2 \dots n)$$

so bestimmt werden, daß diese das canonische System von Differentialgleichungen befriedigen, d. h. man soll die vorderhand noch unbestimmt gelassenen Größen

$$c_0, c_1, \dots, c_m, a_{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m}^{(\nu)}$$

derartig wählen, daß die Differentialgleichungen durch die Reihen befriedigt werden.

Entwickelt man zunächst H_0 nach Potenzen von $t_0 - c_0, t_1 - c_1,$

... $t_m = c_m$, so erhält man das constante Glied der Entwicklung, indem man in H_0

$$t_0 = c_0, t_1 = c_1, \dots t_m = c_m \\ x_{\nu}; \alpha_0, \alpha_1, \dots \alpha_m = \alpha_{\alpha_0, \alpha_1, \dots \alpha_m}^{(\nu)} \quad \text{und} \quad x_0 = \alpha_{0,0,\dots,0}^{(0)}$$

setzt. Das so zu bestimmende Glied — es heiße h_0 — muß für sich verschwinden.

Entwickelt man H_0 bloß nach Potenzen von $(t_0 - c_0)$ und will man den Coefficienten von $(t_0 - c_0)^0$, so muß man in H_0

$$t_0 = c_0 \quad \text{und} \quad x_{\nu}; \alpha_0, \alpha_1, \dots \alpha_m = \frac{\partial^{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m} \mathfrak{P}_{\nu}^{(\alpha_0)}}{\partial t_1^{\alpha_1} \partial t_2^{\alpha_2} \dots \partial t_m^{\alpha_m}} \quad \text{und} \quad x_0 = \mathfrak{P}_0^{(0)}$$

setzen; der Coefficient wird also eine ganze Function von $\mathfrak{P}_0^{(0)}$:

$$H(\mathfrak{P}_0^{(0)})$$

und deren Coefficienten sind wieder ganze Functionen von $t_1, t_2, \dots t_m$ und den Größen

$$\mathfrak{P}_{\nu}^{(0)}, \mathfrak{P}_{\nu}^{(1)}, \dots \mathfrak{P}_{\nu}^{(m_{\nu}-1)} \quad (\nu = 1, 2 \dots m)$$

und Ableitungen dieser. Für

$$t_1 = c_1, t_2 = c_2, \dots t_m = c_m$$

geht $\overline{H}(\mathfrak{P}_0^{(0)})$ in h_0 über.

Offenbar hat man nun $\mathfrak{P}_0^{(0)}$ so zu bestimmen, daß auch $\overline{H}(\mathfrak{P}_0^{(0)})$ verschwindet, und $\mathfrak{P}_0^{(0)}$ eine Potenzreihe von $t_1 - c_1, \dots t_m - c_m$ wird, die für $t_1 = c_1, t_2 = c_2, \dots t_m = c_m$ den Werth $\alpha_{0,0,\dots,0}^{(0)}$ erhält. Das ist aber immer möglich, wenn man die in h_0 vorkommenden Größen

$$c_0, c_1, \dots c_m \quad \text{und} \quad \alpha_{\alpha_0, \alpha_1, \dots \alpha_m}^{(\nu)}$$

so beschränkt, daß die Gleichung $h_0 = 0$ eine endliche und einfache Lösung $\alpha_{0,0,\dots,0}^{(0)}$ zuläßt. Im Übrigen kann man die $(m_1 + m_2 + \dots + m_n)$ Functionen

$$\mathfrak{P}_{\nu}^{(0)}(t_1, t_2 \dots t_m | (c)), \dots \mathfrak{P}_{\nu}^{(m_{\nu}-1)}(t_1, t_2, \dots t_m | (c)) \quad (\nu = 1, 2 \dots n)$$

willkürlich wählen. Wenn sie nur einen gemeinsamen Convergencebereich besitzen, dann hat auch die Reihe

$$\mathfrak{P}_0^{(0)}(t_1, \dots t_m | (c))$$

einen Convergencebereich.

Differentiirt man die Ausdrücke

$$\frac{\partial H_0}{\partial x_0} \frac{\partial^{m_{\nu}} x_{\nu}}{\partial t_0^{m_{\nu}}} = H_{\nu},$$

die wir als Functionen von t_0 ansehen, μ mal nach t_0 , so erhält die μ^{te} Ableitung die Gestalt:

$$\frac{\partial H_0}{\partial x_0} \frac{\partial^{m_v+\mu} x_v}{\partial t_0^{m_v+\mu}} + H_v^{(\mu)},$$

wo $H_v^{(\mu)}$ eine ganze Function von t_0, t_1, \dots, t_m und denjenigen Ableitungen

$$x_v; \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$$

ist, in welchen

$$\alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_m \leq m_v + \mu \quad \text{und} \quad \alpha_0 < m_v + \mu.$$

Daher hat der Coefficient von $\frac{(t_0 - c_0)^\mu}{\mu!}$ in der Entwicklung von

$$\frac{\partial H_0}{\partial x_0} \frac{\partial^{m_v} x_v}{\partial t_0^{m_v}} - H_v,$$

die Form:

$$\frac{\partial H_0}{\partial x_0} \mathfrak{P}_v^{(m_v+\mu)} + \bar{H}_v^{(\mu)},$$

wenn $\frac{\partial H}{\partial x_0}$ und $\bar{H}_v^{(\mu)}$ die Werthe von $\frac{\partial H_0}{\partial x_0}$ und $H_v^{(\mu)}$ für

$$t_0 = c_0 \quad \text{und} \quad x_v; \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m = \frac{\partial^{\alpha_1 + \dots + \alpha_m} \mathfrak{P}_v^{(\alpha_0)}}{\partial t_1^{\alpha_1} \dots \partial t_m^{\alpha_m}}$$

bezeichnen.

Die μ^{te} Ableitung von H_0 nach t_0 hat die Form:

$$\frac{\partial H_0}{\partial x_0} \frac{\partial^\mu x_0}{\partial t_0^\mu} + H_0^{(\mu)}.$$

Versteht man wieder unter $\frac{\partial H_0}{\partial x_0}$ und $\bar{H}_0^{(\mu)}$ die Ausdrücke, welche bei den oben genannten Substitutionen aus $\frac{\partial H_0}{\partial x_0}$ und $H_0^{(\mu)}$ hervorgehen, so lautet der Coefficient von $\frac{(t_0 - c_0)^\mu}{\mu!}$ in der Entwicklung von H_0 nach Potenzen von $(t_0 - c_0)$:

$$\frac{\partial H_0}{\partial x_0} \mathfrak{P}_0^{(\mu)} + \bar{H}_0^{(\mu)}.$$

Sollen nun die gegebenen Differentialgleichungen durch unsere Reihen erfüllt werden, so müssen die Gleichungen bestehen:

$$\frac{\partial H_0}{\partial x_0} \mathfrak{P}_v^{(m_v+\mu)} + \bar{H}_v^{(\mu)} = 0 \quad (v = 0, 1, 2 \dots n), \quad (\alpha)$$

doch weil $\frac{\partial H_0}{\partial x_0}$ für $t_1 = c_1, \dots, t_m = c_m$ nicht verschwindet, kann man

$$\mathfrak{P}_\nu^{(m_\nu+\mu)} = - \frac{\overline{H}_\nu^{(\mu)}}{\frac{\partial \overline{H}_0}{\partial x_0}} \quad \left(\begin{array}{l} \nu = 1, 2, \dots, n \\ \mu = 0, 1, 2, \dots \end{array} \right)$$

und

$$\mathfrak{P}_0^{(1+\mu)} = - \frac{\overline{H}_0^{(\mu)}}{\frac{\partial \overline{H}_0}{\partial x_0}} \quad (\mu = 0, 1, 2, \dots)$$

durch bestimmte Potenzreihen von $(t_1 - c_1), (t_2 - c_2), \dots, (t_m - c_m)$ darstellen, wenn nur

$$\mathfrak{P}_0^{(0)} \text{ und } \mathfrak{P}_\nu^{(0)}, \mathfrak{P}_\nu^{(1)}, \dots, \mathfrak{P}_\nu^{(m_\nu-1)} \quad (\nu = 1, 2, \dots, n)$$

bestimmt sind.

Nimmt man somit die Größen c_0, c_1, \dots, c_m und die in h_0 vorkommenden Größen $\alpha_{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m}^{(\nu)}$ derart an, daß die Gleichung $h_0 = 0$ eine einfache und endliche Wurzel $\alpha_{0,0,\dots,0}^{(0)}$ besitzt und wählt im Übrigen die Functionen

$$\mathfrak{P}_\nu^{(0)}, \mathfrak{P}_\nu^{(1)}, \dots, \mathfrak{P}_\nu^{(m_\nu-1)}$$

willkürlich, so kann man zunächst $\mathfrak{P}_0^{(0)}$ und dann $\mathfrak{P}_0^{(1+\mu)}$ und $\mathfrak{P}_\nu^{(m_\nu+\mu)}$ so bestimmen, daß die Potenzreihen

$$x_\nu = \sum_{\alpha_0=0}^{\infty} \mathfrak{P}_\nu^{(\alpha_0)}(t_1, t_2, \dots, t_m | c_1, c_2, \dots, c_m) \frac{(t_0 - c_0)^{\alpha_0}}{\alpha_0!} \quad (\nu=0, 1, 2, \dots, n)$$

den Differentialgleichungen und $H_0 = 0$ formell genügen. —
Setzt man

$$t_0 = c_0 + u_0, \quad t_1 = c_1 + u_1, \quad \dots \quad t_m = c_m + u_m$$

und versteht unter $x_\nu; \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$ nunmehr die Potenzreihe von u_0, u_1, \dots, u_m , in welche

$$\frac{\partial^{\alpha_0+\alpha_1+\dots+\alpha_m} x_\nu}{\partial t_0^{\alpha_0} \partial t_1^{\alpha_1} \dots \partial t_m^{\alpha_m}}$$

zu transformiren ist, und bezeichnet man

$$\begin{aligned} 1) \quad x_\nu; 1, 0, \dots, 0 &= \frac{\partial x_\nu}{\partial u_0}, \quad x_\nu; 2, 0, \dots, 0 = \frac{\partial x_\nu; 1, 0, \dots, 0}{\partial u_0}, \quad \dots \\ &\dots x_\nu; m_\nu-1, 0, \dots, 0 = \frac{\partial x_\nu; m_\nu-2, 0, \dots, 0}{\partial u_0}, \end{aligned}$$

so werden die Differentialgleichungen des canonischen Systems:

$$2) \quad \frac{\partial H_0}{\partial x_0} \frac{\partial x_\nu; m_\nu-1, 0, \dots, 0}{\partial u_0} - H_\nu = 0.$$

Ferner ist aber für jede Größe $x_\nu; \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$, in welcher

$$\alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_m < m_\nu$$

und mindestens eine der Zahlen α von Null verschieden ist,

$$3) \quad \frac{\partial x_\nu; \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m}{\partial u_0} = \frac{\partial x_\nu; \alpha_0+1, \alpha_1, \dots, \alpha_\mu-1, \dots, \alpha_m}{\partial u_\mu}.$$

Beachtet man endlich, daß neben $H_0 = 0$ die Gleichung:

$$\frac{\partial H_0}{\partial x_0} \frac{\partial x_0}{\partial u_0} + H_0^{(1)} = 0$$

besteht, wo $H_0^{(1)}$ eine ganze Function von u_0, u_1, \dots, u_m und denjenigen Größen $x_\nu; \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$ bezeichnet, in welchen die Summe der α nicht größer als $m_\nu + 1$ und $\alpha_0 < m_\nu$ ist, und eliminirt man mit Hilfe der früheren Gleichungen (α) die Größen

$$\frac{\partial^{m_\nu} x_\nu}{\partial t_0^{m_\nu}} \quad \text{und} \quad \frac{\partial^{m_\nu+1} x_\nu}{\partial t_0^{m_\nu} \partial t_\mu} \quad \left(\begin{matrix} \nu = 1, 2 \dots n \\ \mu = 1, 2 \dots m \end{matrix} \right),$$

so geht eine Gleichung

$$4) \quad \left(\frac{\partial H_0}{\partial x_0} \right)^k \frac{\partial x_0}{\partial u_0} - G_0 = 0$$

hervor, in der G_0 aus denselben Größen zusammengesetzt ist wie H_ν , und wo k eine ganze Zahl bezeichnet.

Da noch

$$5) \quad \frac{\partial t_0}{\partial u_0} = 1, \quad \frac{\partial t_1}{\partial u_0} = 0, \quad \dots \quad \frac{\partial t_m}{\partial u_0} = 0$$

ist, hat man in den Gleichungen 1) bis 5) für die Größen t_0, t_1, \dots, t_m und diejenigen Größen

$$x_\nu; \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m,$$

in welchen $\alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_m < m_\nu$, die Potenzreihen von u_0, u_1, \dots, u_m sind, ein System von Differentialgleichungen der Form:

$$\begin{aligned} G^{(\varrho)}(x_1, x_2, \dots, x_r) \frac{\partial x_\varrho}{\partial u_0} &= G_{0,0}^{(\varrho)}(x_1, x_2, \dots, x_r) + \\ &+ \sum_{\pi=1}^r G_{1,\pi}^{(\varrho)}(x_1, x_2, \dots, x_r) \cdot \frac{\partial x_\pi}{\partial u_1} + \dots + \sum_{\pi=1}^r G_{m,\pi}^{(\varrho)}(x_1, x_2, \dots, x_r) \cdot \frac{\partial x_\pi}{\partial u_m} \\ &(\varrho = 1, 2 \dots r), \end{aligned}$$

worin die Größen $G^{(\varrho)}$, $G_{0,0}^{(\varrho)}$ und $G_{\mu,\pi}^{(\varrho)}$ Potenzreihen von x_1, x_2, \dots, x_r sind. Wir beschäftigen uns mit diesem allgemeinen System.

Lauten die diesen Differentialgleichungen förmell genügenden Potenzreihen

$$x_\varrho = \mathfrak{P}_\varrho(u_0, u_1, \dots, u_m) \quad (\varrho = 1, 2 \dots r),$$

und haben — wie in unserem früheren Falle — die Potenzreihen

$$\mathfrak{P}_\varrho(0, u_1, \dots, u_m) \quad (\varrho = 1, 2 \dots r)$$

einen gemeinsamen Convergenzbereich, gehört ferner die Stelle

$$\mathfrak{P}_\varrho(0, 0, \dots, 0) \quad (\varrho = 1, 2 \dots r)$$

dem Convergenzbereiche aller Reihen G an und ist keine der Functionen $G^{(\varrho)}(x_1, x_2, \dots x_r)$ für

$$x_\varrho = \mathfrak{P}_\varrho(0, 0 \dots 0) \quad (\varrho = 1, 2 \dots r)$$

Null, dann besitzen — so behaupten wir — die Potenzreihen $\mathfrak{P}_\varrho(u_0, u_1, \dots u_m)$ einen gemeinsamen Convergenzbereich und definiren somit r analytische Functionen.

Zum Beweise gehen wir zunächst auf die Differentialgleichungen der einfacheren Gestalt:

$$\frac{\partial x_\varrho}{\partial u_0} = \sum_{\pi=1}^r G_{1,\pi}^{(\varrho)}(x_1, \dots x_r) \frac{\partial x_\pi}{\partial u_1} + \dots + \sum_{\pi=1}^r G_{m,\pi}^{(\varrho)}(x_1, \dots x_r) \frac{\partial x_\pi}{\partial u_m} \\ (\varrho = 1, 2 \dots r)$$

ein und setzen fest, daß in den formell gebildeten Reihen

$$x_\varrho = \mathfrak{P}_\varrho(u_0, u_1, \dots u_m) = \sum_{\beta_0=0}^{\infty} \mathfrak{P}_\varrho^{(\beta_0)}(u_1 \dots u_m) \cdot \frac{u_0^{\beta_0}}{\beta_0!}$$

die r übrigens willkürlich zu fixirenden Reihen

$$\mathfrak{P}_\varrho^{(0)} = \sum_{(\beta)=0}^{\infty} b_{0,\beta_1,\beta_2,\dots,\beta_m}^{(\varrho)} \frac{u_1^{\beta_1}}{\beta_1!} \dots \frac{u_m^{\beta_m}}{\beta_m!}$$

kein constantes Glied $b_{0,0,\dots,0}^{(\varrho)}$ besitzen, wonach die Stelle

$$x_\varrho = \mathfrak{P}_\varrho(0, 0 \dots 0) \quad (\varrho = 1, 2 \dots r)$$

gewiß in dem Convergenzbereiche der Reihen $G_{\mu,\pi}^{(\varrho)}$ liegt. — Substituirt man die Reihen für x_ϱ in die Differentialgleichungen, so wird zunächst

$$\mathfrak{P}_\varrho^{(1)}(u_1, \dots u_m) = \sum_{\pi=1}^r G_{1,\pi}^{(\varrho)}(\mathfrak{P}_1^{(0)}, \dots \mathfrak{P}_r^{(0)}) \frac{\partial \mathfrak{P}_\pi^{(0)}}{\partial u_1} + \dots \\ \dots + \sum_{\pi=1}^r G_{m,\pi}^{(\varrho)}(\mathfrak{P}_1^{(0)}, \dots \mathfrak{P}_r^{(0)}) \frac{\partial \mathfrak{P}_\pi^{(0)}}{\partial u_m}.$$

Hierauf ist jede der zu suchenden Reihen

$$\mathfrak{P}_\varrho^{(\beta_0)}(u_1, \dots u_m) = \sum_{(\beta)=0}^{\infty} b_{\beta_0,\beta_1,\dots,\beta_m}^{(\varrho)} \frac{u_1^{\beta_1}}{\beta_1!} \dots \frac{u_m^{\beta_m}}{\beta_m!} \\ (\varrho = 1, 2 \dots r, \quad \alpha_0 = 1, 2, \dots)$$

als ganze rationale Function einer endlichen Anzahl von Ableitungen

der Größen $\mathfrak{P}_\varrho^{(0)}$ nach $u_1, u_2, \dots u_m$ auszudrücken, deren Coefficienten wiederum Potenzreihen von $\mathfrak{P}_\varrho^{(0)}$ sind. Doch die Coefficienten dieser letzten Reihen sind nur aus einer endlichen Anzahl von Coefficienten der Reihen $G_{\mu,\pi}^{(\varrho)}$ durch Addition und Multiplication zusammengesetzt, so daß auch die Größen

$$b_{\beta_0,\beta_1,\beta_2,\dots,\beta_m}^{(\varrho)}$$

nur ganze rationale Function einer endlichen Anzahl von Größen $b_{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m}^{(q)}$ und den Coefficienten von $G_{\mu, \pi}^{(q)}$ werden.

Soll von den formell genügenden Reihen

$$x_q = \sum_{\beta=0}^{\infty} b_{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m}^{(q)} \frac{u_0^{\beta_0}}{\beta_0!} \frac{u_1^{\beta_1}}{\beta_1!} \dots \frac{u_m^{\beta_m}}{\beta_m!}$$

gezeigt werden, daß sie innerhalb eines Bereiches um die Stelle $u_0 = 0, u_1 = 0, \dots, u_m = 0$ gleichzeitig convergiren, so bringen wir dieselben mit den einem neuen System von Differentialgleichungen gleicher Gestalt:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_q}{\partial u_0} &= \sum_{\pi=1}^r \bar{G}_{1, \pi}^{(q)}(y_1, y_2, \dots, y_r) \frac{\partial y_q}{\partial u_1} + \dots \\ &\dots + \sum_{\pi=1}^r G_{m, \pi}^{(q)}(y_1, y_2, \dots, y_r) \frac{\partial y_q}{\partial u_m}, \end{aligned}$$

worin aber die Reihen $\bar{G}_{\mu, \pi}^{(q)}$ nur positive Coefficienten besitzen, die nicht kleiner sind als die absoluten Beträge der entsprechenden Coefficienten von $G_{\mu, \pi}^{(q)}$, genügenden Reihen in Vergleich.

Fixirt man anstatt der früheren Reihen $\mathfrak{P}_q^{(0)}$ neue $\mathfrak{P}_q^{(0)}$, deren ausschließlich positive Coefficienten gegenüber denen von $\mathfrak{P}_q^{(0)}$ wieder von größserem oder gleichem Betrage sind, so werden die den letzten Differentialgleichungen genügenden Reihen für y_q nur positive Coefficienten haben, die nicht kleiner sind als die absoluten Beträge der gleichnamigen Coefficienten in den Reihen für x_q . Wenn demnach die Reihen für y_q gleichzeitig convergiren, ist das umso mehr bei den Reihen für x_q der Fall.

Zur Vereinfachung des letzten Systems von Differentialgleichungen bemerke man noch, daß man einer positiven Gröfse R der Beschaffenheit, daß die Reihen $G_{\mu, \pi}^{(q)}(x_1, x_2, \dots, x_r)$ alle an der Stelle

$$x_1 = x_2 = \dots = x_r = R$$

convergiren, eine positive Gröfse G so zuordnen kann, daß die positiven Coefficienten der Reihe für

$$\frac{G}{1 - \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_r}{R}}$$

— die $\mathfrak{P}(y_1, y_2, \dots, y_r)$ heiße — größser sind als die absoluten Beträge der entsprechenden Coefficienten der Reihen $G_{\mu, \pi}^{(q)}(x_1, x_2, \dots, x_r)$ und andererseits auch zwei positive Gröfsen R' und G' angebbar sind, so daß die positiven Coefficienten der Reihe für

$$G' \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_m}{1 - \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_m}{R'}}$$

— sie heie $U(u_1, u_2, \dots u_m)$ — größer sind als die absoluten Beträge der gleichnamigen Coefficienten der Reihen

$$\mathfrak{P}_\varrho^{(0)}(u_1, u_2, \dots u_m) \quad (\varrho = 1, 2 \dots r).$$

Lst man nun an Stelle der Reihen $\bar{G}_{\mu, \pi}^{(\varrho)}$ die Reihe $\mathfrak{P}(y_1, y_2, \dots y_\varrho)$ treten und setzt fest, daß die Reihen für y_ϱ in dem Falle, wo $u_0 = 0$ gesetzt wird, in die Reihe $U(u_1, u_2, \dots u_m)$ übergehen, so werden die Reihen für y_ϱ , welche den r Differentialgleichungen

$$\frac{\partial y_\varrho}{\partial u_0} = \mathfrak{P}(y_1, y_2, \dots y_r) \cdot \sum_{\mu=1}^m \left(\frac{\partial y_1}{\partial u_\mu} + \frac{\partial y_2}{\partial u_\mu} + \dots + \frac{\partial y_r}{\partial u_\mu} \right) \\ (\varrho = 1, 2 \dots r)$$

genügen, einander gleich und werden blos von u_0 und

$$\frac{u_1 + u_2 + \dots + u_m}{R'}$$

abhängig.

Setzt man

$$u_0 = u, \quad \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_m}{R'} = z \quad \text{und} \quad \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_r}{G'} = y,$$

und somit

$$\mathfrak{P}(y_1, y_2, \dots y_r) = \frac{G}{1-y}, \quad y_\varrho = \frac{G'}{r} y,$$

so reducirt sich das System auf die einzige Differentialgleichung:

$$\frac{\partial y}{\partial u} = \frac{m \cdot r}{R'} G \frac{1}{1-y} \frac{\partial y}{\partial z} = \frac{a}{1-y} \frac{\partial y}{\partial z},$$

und aus dieser soll y derart als Function von u und z gefunden werden, daß y für $u = 0$ in

$$G' R' \frac{z}{1-z} = b \frac{z}{1-z}$$

bergeht.

Die Methode der unbestimmten Coefficienten liefert aber leicht eine Reihe für y :

$$y = \frac{bz}{1-z} + \sum_{\alpha=1}^{\infty} \mathfrak{P}_\alpha^{(\alpha)}(z) \frac{u^\alpha}{\alpha!},$$

deren Coefficienten $\mathfrak{P}_\alpha^{(\alpha)}$ aus der Gleichung:

$$\begin{aligned} & \mathfrak{P}_1^{(1)}(z) + \mathfrak{P}_2^{(2)}(z) \frac{u}{1} + \mathfrak{P}_3^{(3)}(z) \frac{u^2}{2!} + \dots = \\ &= \frac{a(1-z)}{1-(1+b)z} \frac{1}{\left(\mathfrak{P}_1^{(1)}(z)u + \mathfrak{P}_2^{(2)}(z) \frac{u^2}{2!} + \dots \right) (1-z)} \\ & \quad 1 - \frac{1}{1-(1+b)z} \\ & \propto \left[\frac{b}{(1-z)^2} + \frac{u}{1} \frac{\partial \mathfrak{P}_1^{(1)}(z)}{\partial z} + \frac{u^2}{2!} \frac{\partial \mathfrak{P}_2^{(2)}(z)}{\partial z} + \dots \right] \end{aligned}$$

hervorgehen, indem man die Coefficienten gleicher Potenzen von u gleichsetzt, und diese Reihe wird convergent. Dann hat aber auch die durch die Substitution

$$z = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_m}{R'}$$

zu bildende Reihe einen Convergencebereich, und endlich müssen die Reihen für $x_1, x_1, \dots x_r$ einen gemeinsamen Convergencebereich aufweisen.

Setzt man nicht fest, daß die Reihen

$$\mathfrak{P}_q^{(0)}(u_1, u_2, \dots u_m)$$

kein constantes Glied haben, sondern daß das Werthesystem

$$x_q^{(0)} = \mathfrak{P}_q^{(0)}(0, 0 \dots 0) \quad (q = 1, 2 \dots r)$$

in dem gemeinsamen Convergencebereiche der Reihen $G_{\mu, \pi}^{(q)}$ liege, so bleiben die früheren Betrachtungen unberührt, wenn man die Größen

$$x_q - x_q^{(0)}$$

als die zu bestimmenden Functionen ansieht.

Für ein Gleichungssystem der Gestalt

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_q}{\partial u_0} &= \sum_{\pi=1}^r G_{1, \pi}^{(q)}(x_1, \dots x_r) \frac{\partial x_\pi}{\partial u_1} + \dots \\ &\dots + \sum_{\pi=1}^r G_{m, \pi}^{(q)} \frac{\partial x_\pi}{\partial u_m} + G_{0,0}^{(q)}(x_1, \dots x_r) \\ &\quad (q = 1, 2 \dots r) \end{aligned}$$

gelten dieselben Sätze, denn die Aufnahme einer neuen Gleichung

$$\frac{\partial x_0}{\partial u_0} = 0$$

mit der Festsetzung, daß x_0 für u_0 gleich u_μ sei, erlaubt eine Zurückführung der $(r+1)$ Gleichungen auf die frühere Form, da man die Größen $G_{0,0}^{(q)}$, ohne eine Änderung herbeizuführen, mit $\frac{\partial x_0}{\partial u_\mu}$ multipliciren darf.

Sind endlich die Reihen $G_{\mu, \pi}^{(q)}$ Quotienten zweier Potenzreihen mit dem Nenner $G^{(q)}(x_1, \dots x_r)$, auf daß man wieder das Gleichungssystem auf Seite 258 erhält, so werden auch hier die formell genügenden Reihen $x_q = \mathfrak{P}_q(u_0, u_1, \dots u_m)$ einen gemeinsamen Convergencebereich besitzen und analytische Functionen definiren, wenn nur das Werthesystem

$$\bar{x}_q = \mathfrak{P}_q(0, u_1, \dots u_m) = \mathfrak{P}_q^{(0)} \quad (q = 1, 2 \dots r)$$

dem Convergenzbereiche aller Functionen $G_{\mu\pi}^{(\varrho)}$, $G_{00}^{(\varrho)}$ und $G^{(\varrho)}$ angehört und die Stelle

$$x_{\varrho}^{(0)} = \mathfrak{P}_{\varrho}^{(0)}(0, 0 \dots 0) \quad (\varrho = 1, 2, \dots r)$$

keine Nullstelle von einer oder mehreren der Größen $G^{(\varrho)}$ ist. *)

Nunmehr ist auch bewiesen, daß die angegebenen Potenzreihen

$$x_{\nu} = \mathfrak{P}_{\nu}(t_0, t_1, \dots t_m | (c)) \quad (\nu = 1, 2 \dots n)$$

des ursprünglichen canonischen Systems partieller Differentialgleichungen n Elemente von n diesen Gleichungen genügenden analytischen Functionen der $m + 1$ Variabeln $t_0, t_1, \dots t_m$ sind, deren simultane Fortsetzungen jedenfalls wieder die Gleichungen befriedigen. —

Hier schließen wir die Untersuchungen über den Umfang des Begriffes der analytischen Function ab, denn an der Behandlung der algebraischen Gleichungen und algebraischen Differentialgleichungen ist klar geworden, wie man das ursprünglich gestellte Problem, die durch irgend einen arithmetischen Zusammenhang definirten Größen als analytische Functionen zu kennzeichnen, anzufassen hat.

*) Diese letzte Bedingung ist eigentlich zu beschränkend, indem ja die Reihen $G_{00}^{(\varrho)}$ und $G_{\mu\pi}^{(\varrho)}$ dieselbe Nullstelle haben und die Quotienten $\frac{G_{\mu\pi}^{(\varrho)}}{G^{(\varrho)}}$ und $\frac{G_{00}^{(\varrho)}}{G^{(\varrho)}}$ trotzdem durch Potenzreihen darstellbar sein können.

Fünftes Capitel.

Ableitung der elementaren transcendenten Functionen einer Variablen.

§ 45. Die Exponentialfunction.

Indem wir uns zu der zweiten der zu Beginn des vorigen Capitels definirten Aufgaben wenden, nämlich zu der Ermittlung analytischer Functionen (einer unabhängigen Variablen) von vorgegebener analytisch ausdrückbarer Eigenschaft, nehmen wir stets an, daß ein Element der zu suchenden Function $y = f(x)$, d. i. eine Potenzreihe mit noch unbestimmten Coefficienten

$$y = \mathfrak{P}(x - a) = \sum_{v=0}^{\infty} c_v (x - a)^v$$

die vorausgesetzte Eigenschaft innerhalb seines endlichen, wenn auch noch so kleinen Convergencebereiches besitze. Aus der die Eigenschaft definirenden analytischen Beziehung werden dann jedesmal Schlüsse über die Coefficienten c_v zu ziehen und diese zu bestimmen sein. Wenn die so gefundene Reihe einen Convergencebereich besitzt, existirt eine analytische Function, von der noch gezeigt werden muß, daß ihr in dem ganzen Giltigkeitsbereiche die Eigenschaft zukommt, die das primitive Element in seinem Convergencebereiche aufweist.

Für die ganzzahligen Potenzen einer GröÙe a besteht die in der Gleichung

$$a^{s_1} a^{s_2} = a^{s_1 + s_2}$$

ausgedrückte Eigenschaft. Wir fragen, ob nicht eine analytische Function existirt, welche die hier entlehnte allgemeine Gleichung

$$f(s_1) \cdot f(s_2) = f(s_1 + s_2)$$

erfüllt, wo s_1 und s_2 nicht bloß ganzzahlige, sondern beliebige Werthe aus dem Stetigkeitsbereiche der Function sind.

Wenn eine solche Function $f(s)$ existirt, so muß sie in der Umgebung einer Stelle a in eine Potenzreihe

$$\sum_{v=0}^{\infty} c_v (s - a)^v$$

zu entwickeln sein und in deren (als endlich vorausgesetztem) Convergencebereiche besteht die Gleichung:

$$\sum_{v=0}^{\infty} c_v (s_1 - a)^v \cdot \sum_{v=0}^{\infty} c_v (s_2 - a)^v = \sum_{v=0}^{\infty} c_v (s_1 + s_2 - a)^v.$$

Wir können annehmen, daß das die fundamentale Eigenschaft erfüllende Functionselement die Stelle Null in seinem Convergencebereiche enthalte oder daß dasselbe direct in der Umgebung dieser Stelle als bestehend vorausgesetzt werde, denn substituirt man statt s $x + a$, so wird zufolge der Fundamentalgleichung

$$f(s) = f(a + s - a) = f(a) \cdot f(s - a) = f(a) \cdot f(x) = \sum_{v=0}^{\infty} c_v x^v$$

und nun

$$f(x) = \frac{1}{f(a)} \sum_{v=0}^{\infty} c_v x^v = \mathfrak{P}(x),$$

wenn nur $f(a)$ von Null verschieden ist. Die Gleichung

$$f(s) = f(a) \cdot f(s - a)$$

lehrt aber, daß $f(x)$ für keinen Werth a aus dem Convergencebereiche des primitiven Elementes verschwinden kann, denn sonst wäre $f(s)$ an jeder Stelle desselben Null, und es gäbe keine Function der verlangten Art.

Wenn demnach eine Function von besagter Beschaffenheit existirt, so gehört die Stelle Null und ein endlicher Bereich um diese Stelle zu ihrem Stetigkeitsbereiche.

Wir überlegen nun, daß für die Fortsetzungen von $\mathfrak{P}(x)$ die Fundamentealeigenschaft des primitiven Elementes erhalten bleibt. In der That: wenn wir in der für einen festen Werth a und jeden Werth von x einer Umgebung von a giltigen Gleichung

$$f(x + a) - f(x) \cdot f(a) = 0 \quad (\alpha)$$

für $f(x)$ und $f(x + a)$ die Potenzreihen $\mathfrak{P}(x)$ und $\mathfrak{P}(x + a)$ einsetzen, so müssen in der links entstehenden Reihe die einzelnen Potenzen von x verschwindende Coefficienten haben. Setzen wir aber statt $f(x)$ und $f(x + a)$ Fortsetzungen $\mathfrak{P}(x - x_0 + x_0)$ und $\mathfrak{P}(x - x_0 + (x_0 + a))$ ein, so wird die neue Potenzreihe an unendlich vielen Stellen des Convergencebereiches mit der früheren Reihe übereinstimmen, also auch identisch verschwinden.

Da somit dieselbe Beziehung (α) bei einem festen Werthe a bestehen bleibt und nun a auch variirt werden kann, so haben die Fortsetzungen die Fundamentealeigenschaft mit dem primitiven Elemente wirklich gemein.

Jetzt können wir zeigen, daß die in Frage stehende Function in der Umgebung jeder im Endlichen gelegenen Stelle in eine Potenzreihe entwickelt werden kann.

Wäre nämlich b_1 eine Stelle auf dem bloß endlichen Convergence-

kreise von $\mathfrak{P}(x)$, in deren Umgebung keine durch Vermittlung einer innerhalb des Kreises gelegenen Stelle b_0 ableitbare Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x|b_0, b_1)$$

existirt, so könnte überhaupt keine Function $f(x)$ gefunden werden.

Beachten wir vorher, daß

$$f(a) = f(0) \cdot f(a) \quad \text{also} \quad f(0) = 1 = \mathfrak{P}(0) = c_0$$

und deshalb

$$f(a) \cdot f(-a) = 1 \quad \text{also} \quad f(-a) = \frac{1}{f(a)}$$

ist und bilden darauf

$$f(b_0 + (x - b_0)) = f(b_0) \cdot f(x - b_0)$$

oder $\mathfrak{P}(x - b_0)$, so könnte man nicht mehr weiter schließen, daß

$$f(x - b_1 + (b_1 - b_0)) = f(b_1 - b_0) \cdot f(x - b_1)$$

ist, weil ja b_1 nicht in dem Convergenzbereiche von $\mathfrak{P}(x|b_0)$ liegen kann und eine Reihe

$$\mathfrak{P}(x|b_0, b_1) = f(x - b_1) = \frac{f(x - b_0)}{f(b_1 - b_0)} = \frac{f(x)}{f(b_1)}$$

der Annahme nach nicht existirt. Diese formal gebildete Reihe ist aber zugleich mit $\mathfrak{P}(x)$ convergent, wenn nur $f(b_1)$ von Null verschieden ist. Wir müssen also annehmen, daß es auf der Grenze des endlichen Convergenzbereiches von $\mathfrak{P}(x)$ eine Stelle b_1 gibt, wo $f(x)$ verschwindet. Dann wäre aber wegen

$$f(b_1) = f\left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_1}{2}\right) = f\left(\frac{b_1}{2}\right) \cdot f\left(\frac{b_1}{2}\right) = 0 \quad (\alpha)$$

die Function $f(x)$ auch innerhalb ihres Stetigkeitsbereiches Null, und das widerspricht unserm früheren Satze. Folglich ist die Annahme falsch und es existirt eine Reihe $\mathfrak{P}(x|b_0, b_1)$. Wenn wir so fortfahren, ist die Behauptung erwiesen; die in Frage stehende Function ist durch eine beständig convergente Potenzreihe darstellbar.

Wir beweisen diesen Satz nochmals auf eine zweite Art. *)

Die Gleichung

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) \cdot f(x_2)$$

ist für diejenigen Werthesysteme x_1 und x_2 gültig, für welche

$$|x_1| < \frac{r}{2}, \quad |x_2| < \frac{r}{2},$$

wenn der Convergenzradius des Elementes $\mathfrak{P}(x)$ r genannt wird. Setzt man nun $x_1 = x_2$, so gilt

$$f(2x_1) = f(x_1) \cdot f(x_1) \quad \text{und} \quad f(x_1) = f\left(\frac{x_1}{2}\right) \cdot f\left(\frac{x_1}{2}\right).$$

Doch weil der Convergenzbereich des hier rechts stehenden Ausdruckes

*) Der erste Beweis ist nicht einwurfsfrei. Man kann an der Existenz der Gleichung (α) zweifeln, da b_1 schon auf der Convergenzgrenze des primitiven Elementes liegt.

doppelt so groß ist als der von $f(x_1)$, aber innerhalb des Kreises $|x_1| < r$ die Übereinstimmung beider Seiten angenommen war, so muß $f(x_1)$ soweit eine Bedeutung haben, als dem Product $f\left(\frac{x_1}{2}\right)f\left(\frac{x_1}{2}\right)$ eine zukommt, d. h. der Convergencebereich von $f(x)$ ist ein Kreis mit dem Radius $2r$.

So kann man weiter schließen und findet, daß $\mathfrak{P}(x)$ eine beständig convergente Reihe sein muß.

Um die Existenz von $f(x)$ wirklich zu beweisen, ersetzen wir in der Gleichung

$$f(x_1) \cdot f(x_2) = f(x_1 + x_2)$$

$f(x_1)$, $f(x_2)$ und $f(x_1 + x_2)$ der Reihe nach durch

$$1 + c_1 x_1 + c_2 x_1^2 + \dots + c_n x_1^n + \dots$$

$$1 + c_1 x_2 + c_2 x_2^2 + \dots + c_n x_2^n + \dots$$

$$1 + c_1 (x_1 + x_2) + c_2 (x_1 + x_2)^2 + \dots + c_n (x_1 + x_2)^n + \dots$$

Es wird dann

$$\begin{aligned} f(x_1) \cdot f(x_2) = & 1 + (c_1 x_1 + c_2 x_2) + (c_2 x_1^2 + c_1^2 x_1 x_2 + c_2 x_2^2) + \dots \\ & + (c_n x_1^n + c_{n-1} x_1^{n-1} x_2 + \dots + c_{n-\nu} c_\nu x_1^{n-\nu} x_2^\nu + \dots \\ & + c_n x_2^n) + \dots \end{aligned}$$

gleich

$$\begin{aligned} f(x_1 + x_2) = & 1 + c_1 (x_1 + x_2) + c_2 (x_1^2 + 2x_1 x_2 + x_2^2) + \dots \\ & + c_n \left(x_1^n + \binom{n}{1} x_1^{n-1} x_2 + \dots + \binom{n}{\nu} x_1^{n-\nu} x_2^\nu + \dots \right. \\ & \left. + \binom{n}{n} x_2^n \right) + \dots \end{aligned}$$

und nun liefert die Vergleichung gleichnamiger Glieder die Beziehungen

$$c_{n-1} c_1 = c_n \binom{n}{1}, \quad c_{n-2} c_2 = c_n \binom{n}{2}, \quad \dots$$

$$c_{n-\nu} c_\nu = c_n \binom{n}{\nu}, \quad \dots \quad c_n = c_n.$$

Aus der ersten derselben folgt

$$c_1 c_1 = 2c_2, \quad c_2 c_1 = 3c_3, \quad \dots \quad c_{n-1} c_1 = n c_n.$$

Multipliziert man diese Gleichungen mit einander, so entsteht

$$c_1^2 c_2 c_3 \dots c_{n-1} = n! c_2 c_3 \dots c_n \quad \text{oder} \quad c_n = \frac{c_1^n}{n!}.$$

Wenn wir somit bereits alle Coefficienten c_n durch einen c_1 ausgedrückt haben, müssen wir nachsehen, ob diese Bestimmung mit der allgemeinen Beziehung

$$c_{n-\nu} c_\nu = c_n \binom{n}{\nu}$$

in Einklange steht und ob vielleicht auch c_1 zu berechnen ist. Die Substitution der gefundenen Werthe gibt bloß eine Identität

$$\frac{c_1^{n-v}}{(n-v)!} \frac{c_1^v}{v!} = \frac{c_1^n}{n!} \binom{n}{v} = \frac{c_1^n}{n!} \frac{n(n-1)\dots(n-v+1)}{v!},$$

und wir können c_1 nicht berechnen. Bezeichnen wir c_1 einfach mit c , so folgt die Reihe

$$\mathfrak{P}(x) = 1 + \frac{cx}{1} + \frac{(cx)^2}{2!} + \frac{(cx)^3}{3!} + \dots,$$

die zum mindesten den Convergenzradius $\left|\frac{1}{c}\right|$ oder 1 besitzt, je nachdem die willkürliche Constante c dem absoluten Betrage nach < 1 oder ≥ 1 , denn der Quotient der Coefficienten aufeinanderfolgender Glieder $\frac{c_{v+1}}{c_v}$ bleibt dem absoluten Betrage nach kleiner als $|c|$ oder 1.

Das auf Grund der Fundamenteigenschaft abgeleitete primitive Element convergirt, $f(x)$ existirt und ist als beständig convergente Reihe eine eindeutige ganze transcendente Function.

Mit Rücksicht darauf, daß die Function mit dem Product cx ungeändert bleibt, bezeichnen wir besser cx mit x und $f\left(\frac{x}{c}\right)$ mit $g(x)$.

Nennt man den Werth $g(1)$ e , so gilt für ganze Zahlen $x = m$ die Gleichung

$$g(m) = e^m, \text{ weil } g(m) = g\left(1 + 1 + \dots + 1 \binom{m}{\text{mal}}\right) = g(1)^m$$

ist, und wegen dieser Eigenschaft bezeichnet man $g(x)$ passend mit e^x und es ist

$$e^x = 1 + \frac{x}{1} + \frac{x^2}{2!} + \dots$$

Die Fundamenteigenschaft der neugeschaffenen sogenannten *Exponentialfunction* ist jetzt in folgender Weise zu schreiben:

$$e^{x_1+x_2} = e^{x_1} \cdot e^{x_2}$$

und es gilt

$$e^0 = 1, \quad e^{-x} = \frac{1}{e^x},$$

für jedes positive oder negative ganzzahlige n aber ist

$$e^{nx} = (e^x)^n.$$

Wenn darnach das Argument x der Exponentialfunction durch Addition und Subtraction aus den Größen x_1, x_2, \dots, x_n entstanden ist, so läßt sich e^x rational durch die den Argumenten x_1, x_2, \dots, x_n zugehörigen Functionswerthe darstellen.

Die Ableitung der Exponentialfunction

$$\frac{d e^x}{d x} \text{ ist gleich } e^x.$$

Der Ableitungsproceß bringt demnach keine Änderung hervor.

Diese Eigenschaft von $g(x) = e^x$ folgt auch aus der Functionalgleichung

$$g(x+y) = g(x) \cdot g(y),$$

denn die Differentiation nach den mit einander vertauschbaren Größen x und y gibt

$$\frac{\partial g(x+y)}{\partial x} = \frac{dg(x)}{dx} g(y), \quad \frac{\partial g(x+y)}{\partial y} = \frac{dg(y)}{dy} g(x).$$

Doch weil

$$\frac{\partial g(x+y)}{\partial x} = \frac{\partial g(x+y)}{\partial(x+y)} \frac{\partial(x+y)}{\partial x} = \frac{\partial g(x+y)}{\partial(x+y)} \frac{\partial(x+y)}{\partial y} = \frac{\partial g(x+y)}{\partial y}$$

ist, folgt

$$\frac{1}{g(x)} \cdot \frac{dg(x)}{dx} = \frac{1}{g(y)} \cdot \frac{dg(y)}{dy} = \text{const.}$$

Ordnet man dem Werthe $x=0$ $g(x)=1$ zu und heisst die Constante c , so gibt die Lösung der Differentialgleichung

$$\frac{dg(x)}{dx} = cg(x)$$

wieder

$$g(x) = 1 + \frac{cx}{1!} + \frac{(cx)^2}{2!} + \dots = e^{cx},$$

und setzt man noch fest, dass auch die Ableitung $\frac{dg(x)}{dx}$ an der Stelle Null den Werth 1 besitze, so wird

$$g(x) = e^x.$$

§ 46. Aus der Exponentialfunction rational zusammengesetzte Functionen.

Wir untersuchen jetzt einige aus der Exponentialfunction e^x rational zusammengesetzte, also eindeutige Functionen

$$f(x) = R(e^x).$$

Für diese besteht offenbar auch die Eigenthümlichkeit, dass die zu den drei Argumentwerthen

$$x, y \text{ und } x+y$$

gehörigen Functionswerthe

$$f(x+y), f(x), f(y)$$

eine algebraische Gleichung

$$G(f(x+y), f(x), f(y)) = 0$$

erfüllen, deren Coefficienten von den Variablenwerthen unabhängig sind; man hat ja nur zu bemerken, dass man aus den Gleichungen

$$f(x) = R(e^x), \quad f(y) = R(e^y), \quad f(x+y) = R(e^x \cdot e^y)$$

die Exponentialfunction eliminiren kann.

Man sagt: für die Function $f(x) = R(e^x)$ besteht ein *algebraisches Additionstheorem*. Jede rationale Function von $f(x)$ genügt dann wieder einer Gleichung der eben besagten Art.

Wenn wir die Gleichung $G = 0$ noch x und y differentiiren, so entstehen die Gleichungen

$$\frac{\partial G}{\partial f(x)} \frac{df(x)}{dx} + \frac{\partial G}{\partial f(x+y)} \frac{\partial f(x+y)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial G}{\partial f(y)} \frac{df(y)}{dy} + \frac{\partial G}{\partial f(x+y)} \frac{\partial f(x+y)}{\partial y} = 0$$

und nach Subtraction folgt wegen der Beziehung:

$$\frac{\partial f(x+y)}{\partial x} = \frac{\partial f(x+y)}{\partial y}$$

$$\frac{\partial G}{\partial f(x)} \frac{df(x)}{dx} - \frac{\partial G}{\partial f(y)} \frac{df(y)}{dy} = 0$$

und diese Gleichung ermöglicht es, $f(x+y)$ als algebraische Function von $f(x)$, $f(y)$ und den ersten Ableitungen $\frac{df(x)}{dx}$ und $\frac{df(y)}{dy}$ darzustellen.

Neben dem Additionstheorem kann man auch eine Gleichung zwischen

$$f(x) \quad \text{und} \quad \frac{df(x)}{dx}$$

ableiten, denn man braucht nur e^{cx} aus

$$f(x) = R(e^{cx}) \quad \text{und} \quad \frac{df(x)}{dx} = R'(e^{cx})$$

zu eliminiren.

Die wichtigsten unter den rationalen Functionen der Exponentialfunction sind im Nachstehenden kurz besprochen.

Es seien die Functionen

$$f_1(x) = \frac{1}{2}(e^{xi} + e^{-xi}), \quad f_2(x) = \frac{1}{2i}(e^{xi} - e^{-xi})$$

vorgelegt. — Die halbe Summe oder Differenz der ganzen Functionen e^{xi} und $\frac{1}{e^{xi}}$ sind gewiss wieder ganze Functionen und dargestellt sind sie durch die Reihen:

$$f_1(x) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!} + \dots$$

$$f_2(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \dots$$

Die Fundamentealeigenschaft dieser die Namen *cosinus* und *sinus* führenden Functionen, für welche die Bezeichnung

$$f_1(x) = \cos x, \quad f_2(x) = \sin x$$

gebraucht wird, leiten wir in der angegebenen Weise ab, d. h. wir eliminiren die Exponentialfunction aus den Ausdrücken für

$$\cos(x+y), \quad \cos x, \quad \cos y$$

respective

$$\sin(x+y), \quad \sin x, \quad \sin y$$

oder aus den den Definitionen entspringenden Gleichungen ab:

$$e^{2xi} e^{2yi} - e^{xi} e^{yi} 2 \cos(x+y) + 1 = 0$$

$$e^{2xi} - e^{xi} 2 \cos x + 1 = 0$$

$$e^{2yi} - e^{yi} 2 \cos y + 1 = 0,$$

beziehungsweise

$$e^{2xi} e^{2yi} - e^{xi} e^{yi} 2i \sin(x+y) - 1 = 0$$

$$e^{2xi} - e^{xi} 2i \sin x - 1 = 0$$

$$e^{2yi} - e^{yi} 2i \sin y - 1 = 0.$$

Bemerkt man aber, daß

$$e^{xi} = \cos x + i \sin x, \quad e^{-xi} = \cos x - i \sin x$$

ist, so wird

$$\cos(x+y) = \frac{1}{2} (e^{(x+y)i} + e^{-(x+y)i}) = \cos x \cos y - \sin x \sin y$$

$$\sin(x+y) = \frac{1}{2i} (e^{(x+y)i} - e^{-(x+y)i}) = \sin x \cos y + \cos x \sin y$$

und die Gleichungen, welche das Additionstheorem enthalten, lauten

$$\cos^2(x+y) - 2 \cos(x+y) \cos x \cos y + \cos^2 x + \cos^2 y - 1 = 0$$

$$\sin^2(x+y) - 2 \sin^2(x+y) (\sin^2 x - 2 \sin^2 x \sin^2 y + \sin^2 y)^2$$

$$+ (\sin^2 x - \sin^2 y)^2 = 0,$$

wie sich leicht ergibt, wenn man noch die zwischen $\sin x$ und $\cos x$ bestehende Beziehung berücksichtigt:

$$\cos^2 x + \sin^2 x = 1.$$

Drückt man $\cos(x+y)$ auf die oben angegebene Weise als algebraische

Function von $\cos x$, $\cos y$, $\frac{d \cos x}{dx}$, $\frac{d \sin x}{dx}$ aus, so folgt wegen der

Beziehung:

$$(\cos(x+y) \cos y - \cos x) \frac{d \cos x}{dx} - (\cos(x+y) \cos x - \cos y) \frac{d \cos y}{dy} = 0$$

$$\cos(x+y) = \frac{\cos x \frac{d \cos x}{dx} - \cos y \frac{d \cos y}{dy}}{\cos y \frac{d \cos x}{dx} - \cos x \frac{d \cos y}{dy}}.$$

Weil ferner

$$\frac{d \cos x}{dx} = -\sin x, \quad \frac{d \sin x}{dx} = \cos x$$

ist, erhalten die Additionstheoreme auch die Gestalt:

$$\cos(x+y) = \cos x \cos y - \frac{d \cos x}{dx} \frac{d \cos y}{dy}$$

$$\sin(x+y) = \sin x \frac{d \sin y}{dy} + \sin y \frac{d \sin x}{dx}$$

und $\cos(x+y)$, $\sin(x+y)$ erscheinen als rationale Functionen von $\cos x$, $\cos y$ respective $\sin x$, $\sin y$ und den ersten Ableitungen dieser Functionen.

Die Reihen für $\cos x$ und $\sin x$ lassen auch die Relationen

$$\cos(-x) = \cos x \quad \text{und} \quad \sin(-x) = -\sin x$$

erkennen, und darum bestehen die Gleichungen:

$$\cos(x-y) = \cos x \cos y + \sin x \sin y$$

$$\sin(x-y) = \sin x \cos y - \cos x \sin y$$

und hierauf

$$\cos(x+y) + \cos(x-y) = 2 \cos x \cos y$$

$$\cos(x+y) - \cos(x-y) = -2 \sin x \sin y = -2 \frac{d \cos x}{dx} \frac{d \cos y}{dy}$$

$$\sin(x+y) + \sin(x-y) = 2 \sin x \cos y = 2 \sin x \frac{d \sin y}{dy}$$

$$\sin(x+y) - \sin(x-y) = 2 \cos x \sin y = 2 \frac{d \sin x}{dx} \sin y.$$

Führt man hier die Zeichen ein:

$$x+y = u, \quad x-y = v,$$

so erhält man die Formeln:

$$\cos u + \cos v = 2 \cos \frac{u+v}{2} \cos \frac{u-v}{2}$$

$$\cos u - \cos v = -2 \sin \frac{u+v}{2} \cos \frac{u-v}{2}$$

$$\sin u + \sin v = 2 \sin \frac{u+v}{2} \cos \frac{u-v}{2}$$

$$\sin u - \sin v = 2 \cos \frac{u+v}{2} \sin \frac{u-v}{2}.$$

Aus der Gleichung zwischen $\cos x$ und der Ableitung $\frac{d \cos x}{dx}$ bestehenden Gleichung $\cos^2 x + \sin^2 x = 1$ folgt eine wichtige Eigenschaft der Exponentialfunction: Der absolute Betrag von e^x , wo $x = \xi + i\eta$ und ξ und η reell sei, ist gleich e^ξ .

Da nämlich

$$e^x = e^\xi e^{i\eta} = e^\xi (\cos \eta + i \sin \eta)$$

und

$$|e^x| = |e^\xi e^{i\eta}| = |e^\xi|$$

ist und e^ξ für positive oder negative Werthe von ξ positiv bleibt, indem $e^{-\xi} = \frac{1}{e^\xi}$ zu setzen ist, wird in der That $|e^x| = e^\xi$.

Läfst man ξ von Null an zunehmen, so wächst e^ξ von 1 bis ∞ und erhält dabei jeden in diesem Intervall liegenden Werth nur einmal, weil jedes Glied der Potenzreihe für e^ξ für verschiedene Argumentswerthe ξ_1 und ξ_2 verschiedene Werthe annimmt, und mit $\xi_1 < \xi_2$

$$\frac{\xi_1^n}{n!} < \frac{\xi_2^n}{n!}.$$

Durchläuft ξ die Werthe von 0 bis $-\infty$, so nimmt e^ξ von 1 an ab und wird für unendlich grose Werthe unendlich klein.

Wenn somit e^ξ für reelle Werthe ξ jeden positiven reellen Werth nur einmal annimmt, hat umgekehrt die Gleichung

$$e^{\xi} - a = 0,$$

wo a reell und positiv ist, eine einzige reelle Wurzel ξ .

Weil die Exponentialfunction e^x für keinen endlichen Werth des Argumentes den endlichen Werth Null erhält, sind wir darauf aufmerksam gemacht, daß die Gleichung

$$1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \dots = 0$$

und allgemein die gleich Null gesetzte ganze transcendente Function gewiß nicht in allen Stücken als Verallgemeinerung der algebraischen Gleichung angesehen werden kann, denn indem eine ganze rationale Function n^{ten} Grades jeden Werth n mal annimmt, braucht die ganze Function nicht jeden Werth so oft anzunehmen, als ihr Grad anzeigt, d. i. unendlich oft.

Wir werden später zu zeigen haben, daß in jeder Umgebung eines Werthes a , welchen die eindeutige Function an einer regulären Stelle erhält, Werthe b liegen, welche die Function an beliebig vielen Stellen annimmt und daß die ganze transcendente Function höchstens einen endlichen Werth im regulären Bereiche (d. i. im Endlichen) nicht annimmt. Jetzt wollen wir nur beweisen, daß die Function $e^x = f(x)$ einen Werth a , den sie an zwei endlichen Stellen x_1 und x_2 erhält, auch für unendlich viele Werthe des Argumentes annimmt. In der That ist

$$f(x_1) = a, \quad f(x_2) = a,$$

so wird

$$f(x + x_1) = f(x) a, \quad f(x + x_2) = f(x) a$$

und

$$f(x + x_1) - f(x + x_2) = 0$$

oder

$$f(x + (x_1 - x_2)) = f(x).$$

Bezeichnet man $x_1 - x_2$ mit 2ω , so wird

$$f(x + 2\omega) = f(x),$$

und wenn n eine beliebige ganze positive oder negative Zahl bedeutet, gilt auch

$$f(x + 2n\omega) = f(x).$$

Diese Gleichung besagt, daß unsere Function e^x den Werth, welchen sie für x annimmt, auch für die unendlich vielen Werthe

$$x + 2n\omega \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

erhält.

Man nennt eine analytische Function $F(x)$ *periodisch*, wenn bei beliebigem Werthe ihres Argumentes für eine gewisse constante Gröfse ω die Gleichung

$$F(x + \omega) = F(x)$$

besteht. Die Gröfse ω und jedes ganzzahlige Vielfache von ω heißt

eine *Periode*. Lassen sich alle Perioden einer Function $F(x)$ durch Addition und Subtraction aus r Größen

$$2\omega_1, 2\omega_2, \dots, 2\omega_r$$

zusammensetzen, zwischen denen keine ganzzahlige homogene lineare Relation besteht, so heisst die Function *r*fach *periodisch*.

Wenn darnach die Exponentialfunction einen Werth a zweimal annimmt, so ist sie mindestens einfach periodisch, und weil für jede Periode $2n\omega$

$$f(2n\omega) = 1 \quad \text{oder} \quad e^{2n\omega} = 1$$

ist, findet man die Perioden durch Auflösung der Gleichung

$$e^x - 1 = 0,$$

und zwar ist jede Wurzel $x = \xi$ eine Periode, denn wenn $e^\xi = 1$ ist, besteht die Gleichung

$$f(x + \xi) = f(x)f(\xi) = f(x).$$

Hat die Exponentialfunction die Perioden $2n\omega$, dann besitzen die Functionen

$$\cos x = \frac{1}{2}(e^{xi} + e^{-xi}) \quad \text{und} \quad \sin x = \frac{1}{2i}(e^{xi} - e^{-xi})$$

offenbar die Perioden $\frac{2n\omega}{i}$, d. h. es bestehen die Gleichungen

$$\cos\left(x + \frac{2n\omega}{i}\right) = \cos x, \quad \sin\left(x + \frac{2n\omega}{i}\right) = \sin x,$$

und weil $\cos(0) = 1$, $\sin 0 = 0$ ist, wird

$$\cos \frac{2n\omega}{i} = 1, \quad \sin \frac{2n\omega}{i} = 0$$

und wegen der Beziehungen

$$\cos^2 \frac{\omega}{i} = \cos^2 \frac{\omega}{i} - \sin^2 \frac{\omega}{i} = 1$$

$$\cos^2 \frac{\omega}{i} + \sin^2 \frac{\omega}{i} = 1$$

ist ferner

$$\sin \frac{\omega}{i} = 0, \quad \sin(2n+1) \frac{\omega}{i} = 0$$

$$\cos \frac{\omega}{i} = \pm 1, \quad \cos(2n+1) \frac{\omega}{i} = \pm 1,$$

doch ist über das Zeichen augenblicklich noch nicht zu entscheiden. Jedenfalls ist aber für jedes ganzzahlige n

$$\cos\left(x + n \frac{\omega}{i}\right) - \cos\left(x - n \frac{\omega}{i}\right) = 0$$

$$\sin\left(x + n \frac{\omega}{i}\right) - \sin\left(x - n \frac{\omega}{i}\right) = 0$$

und die halben Perioden $n \frac{\omega}{i}$ sind diejenigen Werthe α , welche — wenn $f(x)$ für $\cos x$ oder $\sin x$ gesetzt wird — die Gleichung

$$f(x + \alpha) - f(x - \alpha) = 0$$

erfüllen. Aus den früheren Darstellungen für die Differenz von

$$f(x + y) - f(x - y)$$

entnehmen wir umgekehrt, daß die halben Perioden $\frac{n\omega}{i}$ $\frac{d \cos x}{dx}$ oder $-\sin x$ zum Verschwinden bringen. Es gilt daher

$$\sin \frac{n\omega}{i} = 0, \quad \cos \frac{n\omega}{i} = \pm 1.$$

Die halben Perioden $m \frac{\omega}{i}$ sind somit als diejenigen x -Werthe erkannt, für welche $z = \cos x$ gleich $+1$ oder -1 wird. Hat man aber einen Werth $x_2 = \frac{\omega_1}{i}$ gefunden, für den $z = -1$ ist, so muß $x_1 = \frac{\omega_1}{i} + \frac{\omega_1}{i}$ ein Werth sein, für welchen $z = +1$ wird.

Wir fragen zunächst, ob es Werthe $x_2 = \frac{\omega_1}{i}, \frac{\omega_2}{i}, \dots, \frac{\omega_r}{i}$ gibt, für die $\cos x$ den Werth -1 erhält, und welches diese sind.

Zur Beantwortung dieser Frage gehen wir auf die Differentialgleichung ein, welcher $\cos x = z$ genügt. Sie lautet

$$\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 = 1 - z^2,$$

und wir wissen, daß $x = 0, z = 1$ zusammengehörige Werthe sind.

Beachten wir, daß z bei den von Null ab zunehmenden reellen Werthen der Variablen x zunächst abnimmt, und das läßt ja die folgende Schreibweise der den Cosinus definirenden Reihe unmittelbar erkennen:

$$\cos x = \left(1 - \frac{x^2}{2}\right) + \frac{x^4}{4!} \left(1 - \frac{x^2}{5.6}\right) + \frac{x^6}{8!} \left(1 - \frac{x^2}{9.10}\right) + \dots,$$

so werden wir aus der Differentialgleichung die Beziehung

$$dx = \frac{-dz}{\sqrt{(1-z)(1+z)}}$$

entnehmen und hier für die Wurzel in der Umgebung der Stelle Null das positive Zeichen festsetzen.

Benützt man in der Gleichung

$$dx = -(1 - z^2)^{-\frac{1}{2}} dz$$

die innerhalb des Bereiches $|z| < 1$ gültige Entwicklung:

$$(1 - z^2)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{z^2}{2} + \frac{1.3}{2.4} z^4 + \frac{1.3.5}{2.4.6} z^6 + \dots,$$

so ist die Function x , welche der obigen Differentialgleichung genügt, offenbar durch das in dem Bereiche $|z| < 1$ gültige Element

$$x = -\left(z + \frac{1}{2} \frac{z^3}{3} + \frac{1.3}{2.4} \frac{z^5}{5} + \dots\right) + \text{const}$$

definiert, und die Constante ist derart zu bestimmen, daß $x = 0$ und $z = 1$ zusammengehörige Werthe sind.

Sie besitzt also den Werth

$$1 + \frac{1}{2 \cdot 3} + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \frac{1}{5} + \dots + \frac{1 \cdot 3 \dots 2n-1}{2 \cdot 4 \dots 2n} \frac{1}{2n+1} + \dots$$

und dieser ist endlich, denn die Glieder dieser Reihe sind kleiner als die entsprechenden der Reihe

$$1 + \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 \cdot 3 \dots 2n-1}{2 \cdot 4 \dots 2n} \frac{1}{2n+2},$$

welche den endlichen Werth 2 hat, weil

$$1 - \left(\frac{1}{2} y + \frac{1}{2} \frac{y^2}{4} + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \frac{y^3}{6} + \dots \right) = \sqrt{1-y}$$

auch für $y = 1$ convergent ist.

Nun erhält man einen Werth x_2 , wenn man in dem Ausdrucke für x $z = -1$ setzt, und zwar folgt

$$x_2 = 2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{1}{3} + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \frac{1}{5} + \dots \right).$$

Wir bezeichnen diesen positiven reellen Werth mit π , dann wird

$$\begin{aligned} \cos \pi &= -1, & \sin \pi &= 0, \\ \cos(\pi + \pi) &= \cos 2\pi = 1, & \sin 2\pi &= 0, \\ \cos 2n\pi &= 1, & \sin 2n\pi &= 0, \\ \cos(2n+1)\pi &= -1, & \sin(2n+1)\pi &= 0 \end{aligned}$$

und wegen

$$\begin{aligned} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) &= -1 = \cos^2 \frac{\pi}{2} - \sin^2 \frac{\pi}{2} \\ 1 &= \cos^2 \frac{\pi}{2} + \sin^2 \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

$$\cos \frac{\pi}{2} = 0, \quad \sin \frac{\pi}{2} = \pm 1.$$

Hier ist das positive Zeichen zu wählen, weil

$$\sin x = \frac{x}{1} \left(1 - \frac{x^2}{2 \cdot 3}\right) + \frac{x^5}{5!} \left(1 - \frac{x^2}{6 \cdot 7}\right) + \frac{x^9}{9!} \left(1 - \frac{x^2}{10 \cdot 11}\right) + \dots$$

offenbar so lange positiv bleibt, als x solche reelle Werthe annimmt, für die $x^2 \leq 6$ ist, aber $\frac{\pi}{2}$ kleiner ist als 2. Es bestehen deshalb die Beziehungen

$$\sin \frac{\pi}{2} = 1, \quad \sin\left(\frac{1}{2} + n\right)\pi = (-1)^n,$$

$$\cos \frac{\pi}{2} = 0, \quad \cos\left(\frac{1}{2} + n\right)\pi = 0$$

und

$$\cos\left(\left(\frac{1}{2} + n\right)\pi - \frac{\pi}{2}\right) = \cos n\pi = (-1)^n,$$

$$\sin\left(\left(\frac{1}{2} + n\right)\pi - \frac{\pi}{2}\right) = \sin n\pi = 0.$$

Die Functionen $\cos x$ und $\sin x$ besitzen demnach die Fundamentalperiode 2π . Wenn wir zeigen können, daß bereits alle Werthe angegeben sind, für welche $\cos x = \pm 1$ ist und $\sin x$ verschwindet, so erscheint nachgewiesen, daß diese Functionen nur die Perioden $2n\pi = \frac{2n\omega}{i}$ besitzen und auch die Exponentialfunction nur einfach periodisch ist, indem alle Perioden positive oder negative ganzzahlige Vielfache von $2\pi i = 2\omega$ sind.

Wir überlegen zunächst, daß $\sin x$ für keine complexen Werthe $x = \xi + i\eta$ verschwinden kann, denn für diese Werthe müßte

$$e^{xi} - e^{-xi} = 0$$

oder

$$e^{2xi} = e^{-2\eta + 2\xi i} = e^{-2\eta}(\cos 2\xi + i \sin 2\xi) = 1$$

und

$$|e^{2xi}| = e^{-2\eta} = 1$$

sein. Doch diese Gleichung erfordert, daß η Null ist, denn es gibt nur diesen einen reellen Werth der verlangten Art. Die Nullstellen von $\sin x$ sind demnach alle reell und an diesen wird $\cos x = \pm 1$. Darum sehen wir nach, ob wir alle Stellen gefunden haben, wo $\cos x$ diese Werthe annimmt.

Der gefundene Werth π war kleiner als 4, und $\frac{\pi}{2}$ ist darum, weil

$$\cos x = \sum_{v=0}^{\infty} \left(1 - \frac{x^2}{(4v+1)(4v+2)} \right) \frac{x^{4v}}{(4v)!}$$

gewiß positiv bleibt, solange das reelle $x < \sqrt{2}$ ist, größer als $\sqrt{2}$, denn es war $\cos \frac{\pi}{2} = 0$.

Gäbe es nun innerhalb der Grenzen $2\sqrt{2}$ und 4 noch einen Werth π' , für den $\cos x = -1$ wäre, so müßte wieder

$$\cos \frac{\pi'}{2} = 0, \quad \sin \frac{\pi'}{2} = 1$$

und

$$\sin(\pi' - \pi) = 0$$

sein. Doch $\pi' - \pi$ ist kleiner als $4 - 2\sqrt{2} < 2$, und der Sinus war solange positiv, als $x^2 \leq 6$ war, daher gibt es innerhalb der genannten Grenzen keinen weiteren Werth, für den $\cos x = -1$ ist. Nun überzeugt uns die Gleichung

$$\cos(x + n\pi) = \cos(x - n\pi) \quad (n = \pm 1, 2, \dots)$$

des Weiteren, daß wir alle verlangten Stellen gefunden haben.

Die Functionen *cosinus* und *sinus* sind also einfach periodisch und ebenso die Exponentialfunction. Dann aber gehen alle Werthe x , für welche

$$e^x = a$$

ist, aus einem ersten x_0 hervor, wenn man ganzzahlige Vielfache von $2\omega = 2\pi i$ beliebig addirt oder subtrahirt. Es ist

$$e^{x_0 \pm 2n\pi i} = e^{x_0} e^{\pm 2n\pi i} = e^{x_0} (\cos 2n\pi \pm i \sin 2n\pi) = e^{x_0} = a$$

und man hat nur zu untersuchen, ob stets ein erster Werth x_0 existirt, für den

$$e^{x_0} = a$$

wird, oder ob die Exponentialfunction (außer Null) jeden Werth a annehmen kann.

Man setze

$$a = \alpha + i\beta, \quad x_0 = \xi_0 + i\eta_0,$$

dann ist

$$|e^{x_0}| = e^{\xi_0} = |\alpha|$$

und diese Gleichung hat eine und nur eine Lösung ξ_0 . Es ist noch η_0 so zu bestimmen, daß

$$e^{i\eta_0} = \cos \eta_0 + i \sin \eta_0 = \frac{\alpha + i\beta}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}$$

wird. Ist a von Null verschieden und complex, so wird $\left| \frac{\alpha}{a} \right| < 1$ und dann gibt es nur einen positiven reellen Werth η_0 zwischen 0 und π , für den

$$\cos \eta_0 = \frac{\alpha}{|\alpha|}.$$

In der That: gäbe es zwei Werthe $\eta_0^{(1)}$ und $\eta_0^{(2)}$, so müßte wegen der Relation

$$\cos \eta_0^{(1)} - \cos \eta_0^{(2)} = -2 \sin \frac{\eta_0^{(1)} + \eta_0^{(2)}}{2} \sin \frac{\eta_0^{(1)} - \eta_0^{(2)}}{2} = 0$$

der Sinus einer von Null verschiedenen Größe, die kleiner ist als π , verschwinden, was nicht angeht. Es gibt somit höchstens einen innerhalb der genannten Grenzen liegenden Werth, für den $\cos \eta_0 = \frac{\alpha}{|\alpha|}$ ist; aber ein solcher Werth existirt gewiß, weil der Cosinus der reellen Variablen eine überall stetige Function ist.

Für diesen Werth η_0 wird

$$\sin^2 \eta_0 = 1 - \cos^2 \eta_0 = 1 - \left| \frac{\alpha}{a} \right|^2 = \frac{\beta^2}{\alpha^2 + \beta^2}$$

und

$$\sin \pm \eta_0 = \pm \sin \eta_0 = \frac{\beta}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}},$$

wo das positive oder negative Zeichen zu wählen ist, je nachdem β positiv oder negativ ist. Wenn β positiv ist, genügt daher der Gleichung

$$e^{i\eta_0} = \frac{\alpha + i\beta}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}$$

eine positive, und wenn β negativ ist, eine negative reelle Größe η_0 , deren absoluter Betrag kleiner ist als π . Ist $\beta = 0$, so setze man je nach einem positiven oder negativen α η gleich 0 oder π , und im

Falle α Null ist, entweder $\eta = \frac{\pi}{2}$ oder $-\frac{\pi}{2}$, je nachdem β positiv oder negativ ist.

Die Gleichung $e^x = a$ ist also stets durch einen endlichen Werth x_0 befriedigt, wenn a nicht Null ist, und darum kann man jede Zahlengröße $a = \alpha + i\beta$ in der Form

$$a = e^{x_0} = e^{\xi_0 + i\eta_0} = e^{\xi_0} (\cos \eta_0 + i \sin \eta_0)$$

darstellen und zwar auf unendlich viele Arten, doch weichen in den verschiedenen Darstellungen die Werthe η_0 nur um Vielfache von 2π von einander ab. Diejenige Darstellung einer nicht negativen reellen Größe a , in welcher $|\eta_0| < \pi$ ist, heisst die Hauptdarstellung. Diese ändert sich stetig mit dem Werthe a , d. h. e^{ξ_0} und η_0 ändern sich stetig. Wenn aber a aus dem Bereiche der Stellen mit negativem imaginären Bestandtheil nach einer Stelle a' des negativen Theiles der reellen Axe übergeht, so müssen die zugehörigen η_0 -Werthe mit der unteren Grenze $-\pi$ nach π überspringen, sofern die Stellen der kleinsten Umgebung von a' , deren imaginärer Bestandtheil positiv ist, wieder die Hauptdarstellung finden sollen. Mit anderen Worten: in der Hauptdarstellung ist η_0 an den Stellen a der negativen Abscissenaxe unstetig.

Man kann η_0 offenbar auch aus der Gleichung $\sin \eta_0 = \frac{\beta}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}$ berechnen und η_0 in das Intervall von $-\frac{\pi}{2}$ bis $\frac{3\pi}{2}$ einschließen und die positive Grenze zu ihren Werthen zählen, oder man kann η_0 aus einer Gleichung

$$\sin(\varepsilon + \eta_0) = \frac{\beta}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}$$

berechnen, wo ε beliebig gewählt ist, und festsetzen, daß $0 < \eta_0 \leq 2\pi$ werde usw. Darnach wird blos die Art der Hauptdarstellung einer ersten Lösung der Gleichung $e^x = a$ geändert. —

Man kann jetzt auch jede Gleichung

$$\sin x = a \quad \text{oder} \quad \cos y = a$$

auflösen, indem man zuerst die Anfangswerthe aus den Gleichungen

$$e^{ix} = ia \pm \sqrt{1 - a^2}$$

oder

$$e^{iy} = a \pm \sqrt{a^2 - 1}$$

entnimmt. Sind die Hauptlösungen $x_0^{(1)}$ und $x_0^{(2)}$ respective $y_0^{(1)}$ und $y_0^{(2)}$, so sind alle übrigen Lösungen

$$x_0^{(1)} \pm 2n\pi \quad \text{und} \quad -x_0^{(1)} \pm (2m + 1)\pi$$

oder

$$y_0^{(1)} \pm 2n\pi \quad \text{und} \quad -y_0^{(1)} \pm 2m\pi,$$

denn es ist

$$e^{i(x_0^{(1)} + x_0^{(2)})} = -1, \quad e^{i(y_0^{(1)} + y_0^{(2)})} = 1$$

und

$$x_0^{(1)} + x_0^{(2)} = (2k + 1)\pi, \quad y_0^{(1)} + y_0^{(2)} = 2k\pi,$$

wo k irgend eine ganze Zahl bezeichnet.

Die inversen Functionen der eindeutigen analytischen Functionen

$$e^x = y, \quad \sin x = y, \quad \cos x = y$$

$x = \varphi(y)$ sind unendlich vieldeutige analytische Functionen, denn zu einem Werthe der jetzt unabhängigen Variablen y gehören unendlich viele Werthe von x , die allerdings nur um Vielfache einer constanten Gröfse $2\pi i$ von einander verschieden sind. Sie genügen beziehungsweise den Differentialgleichungen

$$\frac{dy}{dx} = y, \quad \frac{dy}{dx} = +\sqrt{1-y^2}, \quad \frac{dy}{dx} = -\sqrt{1-y^2},$$

und zwar sind der Reihe nach

$$x = 0, y = 1; \quad x = 0, y = 0; \quad x = 0, y = -1$$

zusammengehörige Werthepaare, und in der Umgebung der Stelle $y = 0$ sind die Wurzeln positiv zu nehmen, weil y bei den von Null an zunehmenden x -Werthen zunächst wächst respective abnimmt.

Die Stellen

$$y = 0, \infty; \quad y = \pm 1, \infty; \quad y = \pm 1, 0$$

werden für die neuen Functionen singuläre Stellen sein, denn in deren Umgebung läßt sich x gewifs nicht als Potenzreihe von y darstellen.

Die Umkehrfunction von $\cos x$ hat — wie wir sahen — in der Umgebung der Stelle $y = 0$ die Entwicklung:

$$x = \varphi(y) = \frac{\pi}{2} - \left[y + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 \cdot 3 \dots (2n-1)}{2 \cdot 4 \dots 2n} \frac{y^{2n+1}}{2n+1} \right].$$

Für die Umkehrfunction des Sinus folgt mit Rücksicht auf die andere Anfangsbedingung:

$$x = \psi(y) = y + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 \cdot 3 \dots (2n-1)}{2 \cdot 4 \dots 2n} \frac{y^{2n+1}}{2n+1}$$

und deshalb stehen die Functionen $\varphi(y)$ und $\psi(y)$ in dem Convergencebereiche der definirenden Elemente und somit in ihrem gemeinsamen Stetigkeitsbereiche in der Beziehung

$$\varphi(y) + \psi(y) = \frac{\pi}{2},$$

die entsprechenden Relationen zwischen dem Sinus und Cosinus lauten dann

$$\cos x = \sin\left(\frac{\pi}{2} - x\right)$$

$$\sin x = \cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right).$$

Es soll auch das in der Umgebung der Stelle $y = 1$ gültige Element der Umkehrfunction von $e^x = y$ angegeben werden.

Weil die Ableitungen

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{y}, \quad \frac{d^2x}{dy^2} = -\frac{1}{y^2}, \quad \dots \quad \frac{d^v x}{dy^v} = (-1)^{v-1} \frac{(v-1)!}{y^v}$$

an der Stelle ($y = 1, x = 0$) die Werthe

$$1, -1, 1.2, -1.2.3, \dots, (-1)^{v-1} .1.2 \dots (v-1)$$

annehmen, wird

$$x = \chi(y) = \sum_{v=1}^{\infty} (-1)^{v-1} (v-1)! \frac{(y-1)^v}{v!} = \sum_{v=1}^{\infty} (-1)^{v-1} \frac{(y-1)^v}{v}.$$

Unter den rationalen Functionen der Exponentialfunction e^x mit den Perioden $2n\pi i$ oder der Function $e^{\frac{\pi i}{\omega} x}$ mit der Fundamentalperiode 2ω führen wir zunächst noch die folgende an:

$$y = \frac{1}{i} \frac{e^{2xi} - 1}{e^{2xi} + 1} = \frac{\sin x}{\cos x},$$

die den Namen *Tangente* von x führt.

Man kann diese Function $\operatorname{tg} x$ in der durch die Beziehung $|x| < \frac{\pi}{2}$ definirten Umgebung der Stelle $x = 0$ in eine Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x) = \sum_{v=0}^{\infty} a_v x^v$$

entwickeln, weil $\cos x$ erst für $x = \frac{\pi}{2}$ und $-\frac{\pi}{2}$ verschwindet. Durch die Methode der unbestimmten Coefficienten findet man aus der Gleichung

$$\frac{\sum_{\mu=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu}}{(2\mu+1)!} x^{2\mu+1}}{\sum_{\mu=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu}}{(2\mu)!} x^{2\mu}} = \sum_{v=0}^{\infty} a_v x^v,$$

dafs alle Coefficienten a_v mit geradem Index v verschwinden und die mit ungeradem Index der Recursionsformel genügen:

$$a_{2n+1} = \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} + \left\{ \frac{a_{2n-1}}{2!} - \frac{a_{2n-3}}{4!} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{a_1}{(2n)!} \right\},$$

welche nach der Substitution

$$a_v = \frac{c_v}{v!}$$

in die folgende übergeht:

$$\begin{aligned} c_{2n+1} - \binom{2n+1}{2} c_{2n-1} + \binom{2n+1}{4} c_{2n-3} - \dots + (-1)^n \binom{2n+1}{2n} c_1 \\ = (-1)^n. \end{aligned}$$

Weil a_1 und c_1 gleich Eins ist, wird $c_3 = 2, c_5 = 16$ usw.

Jede Fortsetzung des primitiven Elementes besitzt ein oder zwei auf einander folgende Nullstellen von $\cos x$ als singuläre Stellen.

Weil an der einfachen Nullstelle $(\frac{1}{2} + n)\pi$ von $\cos x$ $\sin x$ nicht verschwindet, hat $\operatorname{tg} x$ daselbst eine Darstellung in der Form

$$\left(x - \left(\frac{2n+1}{2}\pi\right)\right)^{-1} \Re\left(x - \frac{2n+1}{2}\pi\right)$$

d. h. die Nullstellen von $\cos x$ sind für die Function $\operatorname{tg} x$ außerwesentlich singuläre Stellen der ersten Ordnung.

Das Additionstheorem nimmt die in den folgenden Formeln enthaltene Gestalt an:

$$\begin{aligned}\frac{\sin(x+y)}{\cos(x+y)} &= \operatorname{tg}(x+y) = \frac{\operatorname{tg} x + \operatorname{tg} y}{1 - \operatorname{tg} x \operatorname{tg} y} \\ \operatorname{tg}(x-y) &= \frac{\operatorname{tg} x - \operatorname{tg} y}{1 + \operatorname{tg} x \operatorname{tg} y} \\ \operatorname{tg}(x+y) - \operatorname{tg}(x-y) &= 2 \frac{\operatorname{tg} y (1 + \operatorname{tg}^2 x)}{1 - \operatorname{tg}^2 x \operatorname{tg}^2 y}.\end{aligned}$$

Doch weil

$$\frac{d \operatorname{tg} x}{dx} = \frac{\cos^2 x + \sin^2 x}{\cos^2 x} = 1 + \operatorname{tg}^2 x = \frac{1}{\cos^2 x}$$

ist, gilt die Beziehung:

$$\operatorname{tg}(x+y) - \operatorname{tg}(x-y) = \frac{2 \operatorname{tg} y \frac{d \operatorname{tg} x}{dx}}{1 - \operatorname{tg}^2 x \operatorname{tg}^2 y}.$$

Für die halben Perioden α ist wiederum

$$\operatorname{tg}(x+\alpha) - \operatorname{tg}(x-\alpha) = 0,$$

daher sind α diejenigen Werthe von y , für welche $\operatorname{tg} y$ verschwindet, also wird α gleich $2n\pi$.

Ähnliche Betrachtungen gelten für den Quotienten

$$\frac{\cos x}{\sin x} = \frac{1}{\operatorname{tg} x},$$

der als die *Cotangente* von x bezeichnet wird. Diese neue Function $y = \operatorname{cotg} x$ genügt der Differentialgleichung

$$\frac{dy}{dx} = -(1 + y^2) = -\frac{1}{\sin^2 x}$$

und $x = \frac{\pi}{2}$, $y = 0$ sind zusammengehörige Werthe.

Das Reciproke des Cosinus und Sinus heisst die *Secante* und *Cosecante*:

$$\frac{1}{\cos x} = \sec x, \quad \frac{1}{\sin x} = \operatorname{cosec} x.$$

Diese Functionen stehen mit der Tangente und Cotangente in der einfachen Beziehung

$$\frac{1}{\cos^2 x} = 1 + \operatorname{tg}^2 x = \sec^2 x; \quad \frac{1}{\sin^2 x} = 1 + \operatorname{cotg}^2 x = \operatorname{cosec}^2 x$$

und genügen den Differentialgleichungen

$$\frac{dy}{dx} = y\sqrt{y^2 - 1}; \quad \frac{dy}{dx} = -y\sqrt{y^2 - 1}$$

und zwar sind bei positiv gewählten Wurzeln $x=0$, $y=1$ respective $x = \frac{\pi}{2}$, $y=1$ zusammengehörige Werthe.

§ 47. Logarithmus.

Wir wenden uns zur Lösung einer zweiten Functionalgleichung:

$$f(x) + f(y) = f(xy).$$

Die zu suchende analytische Function muß, wenn sie überhaupt existirt, in der Umgebung einer Stelle x_0 durch eine convergente Potenzreihe

$$f(x) = \sum_{v=0}^{\infty} a_v (x - x_0)^v$$

darstellbar sein; doch weil in deren Convergenzbereiche

$$f(x_0 + (x - x_0)) = f\left(x_0 \left(1 + \frac{x - x_0}{x_0}\right)\right) = f(x_0) + f\left(1 + \frac{x - x_0}{x_0}\right)$$

gilt, und

$$f\left(1 + \frac{x - x_0}{x_0}\right) + f(x_0) = a_0 + a_1 x_0 \left(\frac{x - x_0}{x_0}\right) + a_2 x_0^2 \left(\frac{x - x_0}{x_0}\right)^2 + \dots$$

ist, so folgt, wenn wir an Stelle $a_v x_0^v$ c_v und für $\frac{x - x_0}{x_0}$ x schreiben, auch eine Entwicklung

$$f(1 + x) + f(x_0) = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + \dots$$

Da zufolge der Fundamentalgleichung die Beziehung

$$f(x) + f(1) = f(x)$$

besteht und daher $f(1)=0$ sein muß, ergibt sich aus der letzten Entwicklung für den Werth $x=0$ $f(x_0) = c_0$, und man erhält die Darstellungen:

$$f(1 + x) = \sum_{v=1}^{\infty} c_v x^v \quad \text{und} \quad f(x) = \sum_{v=1}^{\infty} c_v (x - 1)^v.$$

Schreibt man die Functionalgleichung in der Form:

$$f(1 + x + y) = f(1 + x) + f\left(1 + \frac{y}{1 + x}\right),$$

so muß endlich

$$\sum_{v=1}^{\infty} c_v (x + y)^v = \sum_{v=1}^{\infty} c_v x^v + \sum_{v=1}^{\infty} c_v \left(\frac{y}{1 + x}\right)^v$$

sein, und wenn wir hier die gleichnamigen Glieder gleich setzen, erhält man die Werthe der noch unbestimmten Coefficienten c_v .

Zunächst sind die von y freien Terme beiderseits gleich und der Coefficient von y^v ist links

$$c_\nu + c_{\nu+1} \binom{\nu+1}{1} x + c_{\nu+2} \binom{\nu+2}{2} x^2 + \dots = \sum_{\mu=0}^{\infty} c_{\nu+\mu} \binom{\nu+\mu}{\mu} x^\mu$$

und rechts:

$$\frac{c_\nu}{(1+x)^\nu} \quad \text{oder} \quad c_\nu \left(1 - \nu \frac{x}{1} + \frac{\nu(\nu+1)}{1 \cdot 2} x^2 - \frac{\nu(\nu+1)(\nu+2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} x^3 + \dots \right).$$

Diese Entwicklung wird leicht aus derjenigen für $\frac{1}{1+x}$ durch den Schluß von ν auf $(\nu+1)$ bewiesen.

Da

$$(-1)^\mu \frac{\nu(\nu+1)(\nu+2)\dots(\nu+\mu-1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \dots \mu} = \frac{(-\nu)}{1} \frac{(-\nu-1)}{2} \dots \frac{(-\nu-\mu+1)}{\mu}$$

ist, kann man diesen Ausdruck als den μ^{ten} Binomialcoefficienten der $(-\nu)^{\text{ten}}$ Potenz einführen und mit $\binom{-\nu}{\mu}$ bezeichnen. Dann ist

$$\frac{c_\nu}{(1+x)^\nu} = c_\nu \sum_{\mu=0}^{\infty} \binom{-\nu}{\mu} x^\mu.$$

Der Vergleich der gefundenen Coefficienten von y^ν führt auf die Relation

$$c_{\nu+\mu} \binom{\nu+\mu}{\mu} = c_\nu \binom{-\nu}{\mu}$$

oder

$$c_{\nu+\mu} \frac{(\nu+\mu)(\nu+\mu-1)\dots(\nu+1)}{1 \cdot 2 \dots \mu} = c_\nu (-1)^\mu \frac{\nu(\nu+1)\dots(\nu+\mu-1)}{1 \cdot 2 \dots \mu},$$

aus der die Beziehung folgt:

$$c_{\nu+\mu} = c_\nu (-1)^\mu \frac{\nu}{\nu+\mu} \quad (\nu = 1, 2, \dots, \infty).$$

Es ist daher für $\nu = 1$

$$c_{\mu+1} = c_1 \frac{(-1)^\mu}{\mu+1},$$

und wenn man hierin für μ $\nu-1$ oder $\mu+\nu-1$ setzt, ergeben sich die Formeln:

$$c_\nu = c_1 \frac{(-1)^{\nu-1}}{\nu}, \quad c_{\nu+\mu} = c_1 \frac{(-1)^{\nu+\mu-1}}{\nu+\mu},$$

welche die voranstehende Gleichung identisch erfüllen.

Ersetzt man noch c_1 durch $\frac{1}{c}$, so erhält die Potenzreihe für $f(x)$ in der Umgebung der Stelle $x=0$ die Gestalt

$$f(x) = \frac{1}{c} \left\{ (x-1) - \frac{(x-1)^2}{2} + \frac{(x-1)^3}{3} - \dots \right\}$$

und in der Umgebung der Stelle x_0 besteht die Darstellung:

$$f(x) = f(x_0) + f\left(1 + \frac{x-x_0}{x_0}\right) = f(x_0) + \frac{1}{c} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu-1}}{\mu} \left(\frac{x-x_0}{x_0}\right)^\mu.$$

Der Convergencebereich dieser Reihen kann die Stelle $x=0$ nicht enthalten, denn es wird

$$f(0) = f(x_0) - \frac{1}{c} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots \right)$$

und hier ist die eingeklammerte Reihe unendlich und $f(x_0)$ ist endlich, weil x_0 eine Stelle des Stetigkeitsbereiches der Function ist. Die Stelle $x=0$ liegt aber auf der Grenze des Convergencebereiches, weil die Reihen für die durch die Bedingungen

$$|x-1| < 1 \quad \text{respective} \quad |x-x_0| < |x_0|$$

definierten Stellen endlich sind, indem ja der absolute Betrag jedes einzelnen Gliedes für diejenigen Stellen, wo $|x-1|=1$ oder $|x-x_0|=|x_0|$, endlich bleibt.

Wir behaupten, daß die zweite Reihe eine Fortsetzung der ersten ist. In der That nehmen wir in dem Bereiche $|x-1| < 1$ eine Stelle x_1 an und bilden aus der Reihe $\mathfrak{P}(x|1)$ das Element

$$\mathfrak{P}(x|1, x_1) = \mathfrak{P}(x_1|1) + \mathfrak{P}'(x_1|1) \frac{x-x_1}{1} + \mathfrak{P}''(x_1|1) \frac{(x-x_1)^2}{2!} + \dots,$$

indem wir die Ableitungen aufsuchen:

$$\mathfrak{P}'(x|1) = \frac{1}{c} \sum_{\mu=0}^{\infty} (-1)^{\mu} (x-1)^{\mu} = \frac{1}{c} \frac{1}{1+(x-1)} = \frac{1}{cx}$$

$$\mathfrak{P}^{(2)}(x|1) = \frac{1}{c} \sum_{\mu=0}^{\infty} (-1)^{\mu+1} (\mu+1) (x-1)^{\mu} = -\frac{1}{cx^2}$$

.

$$\begin{aligned} \mathfrak{P}^{(v)}(x|1) &= \frac{1}{c} \sum_{\mu=0}^{\infty} (-1)^{\mu+v-1} (\mu+1) (\mu+2) \dots (\mu+v-1) (x-1)^{\mu} \\ &= (-1)^{v-1} \frac{(v-1)!}{cx^v}, \end{aligned}$$

so hat dasselbe die Form:

$$\mathfrak{P}(x|1, x_1) = f(x_1) + \frac{1}{c} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu-1}}{\mu} \left(\frac{x-x_1}{x_1} \right)^{\mu}$$

und besitzt den Convergencekreis $|x_1|$. Ist x_2 eine Stelle in dem Convergencekreise der neuen Reihe, so folgt ebenso:

$$\mathfrak{P}(x|1, x_1, x_2) = f(x_2) + \frac{1}{c} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu-1}}{\mu} \left(\frac{x-x_2}{x_2} \right)^{\mu}$$

und so fortfahrend, gelangt man offenbar zu der Reihe

$$\mathfrak{P}(x|1, x_1, x_2, \dots, x_n, x_0) = f(x_0) + \frac{1}{c} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu-1}}{\mu} \left(\frac{x-x_0}{x_0} \right)^{\mu},$$

die früher mit Hilfe des Fundamentaltheorems abgeleitet werden konnte. Wir sehen somit, daß es eine analytische Function $f(x)$ mit einer

willkürlichen Constanten c gibt, die unserer Functionalgleichung genügt. Sie besitzt im Endlichen nur die einzige singuläre Stelle $x=0$, wie der Convergencebereich jeder Fortsetzung des primitiven Elementes ersehen läßt.

Um die Beschaffenheit der Function $f(x)$ an der Stelle Null zu untersuchen, kann man die Reihe $\mathfrak{P}(x|1)$ fortsetzen und nachsehen, ob jede Fortsetzung

$$\mathfrak{P}(x|1, x_1, x_2, \dots, x_n, 1)$$

mit der ersten Reihe identisch ist. Man wähle hierzu continuirliche Wege, welche die singuläre Stelle nicht umgeben, und andere, welche sie umgeben. Gelangt man auf solche Weise zu verschiedenen Werthen, so ist die durch das primitive Element definirte monogene analytische Function vieldeutig. Diese Art der Untersuchung liefse aber an Umständlichkeit nichts zu wünschen übrig.

Erinnern wir uns, daß die eindeutige Function an einer singulären Stelle c nicht die Bedingung

$$\lim_{x \rightarrow c} ((x - c) f(x)) = 0$$

erfüllen konnte, läßt sich aber beweisen, daß hier

$$\lim_{x \rightarrow 0} (x f(x)) = 0$$

wird, so muß die neue Function vieldeutig sein.

Setzt man der Einfachheit halber die willkürliche Constante $c=1$, und bemerkt, daß der reelle Theil von

$$\varphi(x) = f(x) = \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu}}{\mu} (x-1)^{\mu}$$

bei abnehmenden Werthen $|x|$ wächst, so werden den abnehmenden positiven reellen Größen

$$r_1, r_2, \dots, r'$$

wachsende Functionalwerthe zugehören:

$$\varphi(r_1) < \varphi(r_2) < \dots < \varphi(r').$$

Schließt man r' in beliebig kleine Grenzen $\frac{1}{2^n}$ und $\frac{1}{2^{n+1}}$ ein und stellt die Ungleichung auf:

$$-f\left(\frac{1}{2^n}\right) = -nf\left(\frac{1}{2}\right) = -nf\left(1 - \frac{1}{2}\right) = n\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2 \cdot 4} + \frac{1}{3 \cdot 8} + \frac{1}{4 \cdot 16} + \dots\right) < n,$$

wonach

$$-\frac{1}{2^n} f\left(\frac{1}{2^n}\right) < \frac{n}{2^n} = \frac{n}{(1+1)^n} = \frac{n}{1 + \binom{n}{1} + \binom{n}{2} + \dots + \binom{n}{n}}$$

ist und die Größen

$$\frac{1}{2^{n-1}} f\left(\frac{1}{2^n}\right) \quad \text{und} \quad \frac{1}{2^n} f\left(\frac{1}{2^{n+1}}\right)$$

mit wachsendem n beliebig klein werden, so folgt:

$$-r'f(r') < -r'f\left(\frac{1}{2^{n+1}}\right) < -\frac{1}{2^n}f\left(\frac{1}{2^{n+1}}\right) < \delta. \quad \text{q. e. d.}$$

Die Function $f(x)$ ist nach diesem Satze wirklich vieldeutig, und nun könnte man fragen, ob $f(x)$ in der Umgebung der Stelle Null ein Verhalten besitzt wie die algebraische Function in der Umgebung ihrer Verzweigungsstellen. Da aber die Function $e^y = x$ der Differentialgleichung $\frac{dx}{dy} = x$ genügt und aus der Differentialgleichung

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{x}$$

bei der Zuordnung $x = 0$ $y = 1$ das Element

$$y = -\sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu}}{\mu} (x-1)^{\mu}$$

gefunden war, so erkennen wir in der der Functionalgleichung

$$f(x) + f(y) = f(xy)$$

genügenden analytischen Function $f(x)$ gerade die Umkehrfunction der Exponentialfunction $e^y = x$, und diese ist unendlich vieldeutig, da zu einem Werthe x unendlich viele Werthe cy gehörten.

Die neue Function $f(x)$ heisst der *Logarithmus* von x und wird, im Falle die Constante $c = 1$ ist, mit $\log x$ bezeichnet. Dann wird

$$f(x) = \frac{1}{c} \log x,$$

und hier kann man c so wählen, daß $f(x)$ an einer bestimmten Stelle x_0 einen beliebig festgesetzten Werth annimmt. Ist $f(x_0) = 1$, so heisst $f(x)$ der Logarithmus von x in Bezug auf die Basis x_0 , und zwar wird dieser *künstliche* Logarithmus durch die Logarithmen für die Basis e (wo $c = 1$ ist), welche *natürliche* heissen, in folgender Weise darzustellen sein:

$$f(x) = \frac{\log x}{\log x_0}.$$

In der Analysis wird durchwegs der natürliche Logarithmus verwendet.

Da jede von Null verschiedene, nicht reelle negative Zahlengröße $a = \alpha + i\beta$ auf eine einzige Art in der Form

$$a = e^{\xi_0} = e^{\xi_0 + i\eta_0} = e^{\xi_0}(\cos \eta_0 + i \sin \eta_0)$$

dargestellt werden konnte, wo

$$e^{\xi_0} = |a|$$

ist und die reelle Größe η_0 einen absoluten Betrag kleiner als π besitzt, so wird der Werth des natürlichen Logarithmus von a

$$\log a = \xi_0 + i\eta_0 = \log |a| + i\eta_0$$

und alle anderen Werthe gehen durch Addition ganzzahliger Vielfacher der Größe $2\pi i$ hervor.

Man bezeichnet den erstgenannten Werth des natürlichen Logarithmus als *Hauptwerth* $\text{Log } a$ oder $\log \text{ nat } a$.

Als Hauptwerth negativ reeller Zahlengrößen a wird die GröÙe

$$\xi_0 + i\pi$$

definirt. *) —

In der Umgebung einer endlichen Stelle a existiren die unendlich vielen Elemente

$$\log x = \text{Log } a + 2n\pi i + \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu}}{\mu} \left(\frac{x-a}{a} \right)^{\mu}.$$

Die Fortsetzungen eines Elementes, welche nicht mit denen eines zweiten übereinstimmen, constituiren einen Zweig des Logarithmus, und der Inbegriff der Hauptwerthe, der aus demjenigen Elemente hervorgeht, in welchem $n=0$ ist, heißt der *Hauptzweig* der Function.

Der Logarithmus hat die beiden singulären Stellen 0 und ∞ und ist in dem durch diese Stellen begrenzten Continuum durchwegs endlich und stetig, der einzelne Zweig aber ist längs der von 0 bis $-\infty$ sich erstreckenden negativ reellen Axe unstetig, indem η_0 zufolge der früheren Festsetzungen bei Überschreiten dieser Axe aus dem Gebiete von Größen mit negativ reellem und imaginärem Bestandtheil um 2π wächst. Setzt man aber den Logarithmus mit Hilfe der Potenzreihen fort, so kommt man bei dem Überschreiten des negativen Theiles der Abscissenaxe in das Gebiet eines nächsten Zweiges etwa aus dem des n^{ten} in das Gebiet des $(n-1)^{\text{ten}}$ Zweiges.

Da der Übergang von einem Zweige in einen anderen auf geschlossenem Wege nur möglich ist, wenn der von dem Wege begrenzte Bereich eine singuläre Stelle enthält, so kann die Fortsetzung des Logarithmus von einer Stelle a aus zu keinem anderen Werthe in a führen, sofern der bei der Fortsetzung eingehaltene geschlossene Weg die Stelle $x=0$ oder, was auf dasselbe hinauskommt, die Stelle ∞ nicht umschließt, selbst wenn man dabei aus dem Gebiete eines Zweiges in das eines anderen und dann wieder in das des ersten gelangen sollte. Ein geschlossener Weg um die Stelle Null, der aber die negative Abscissenaxe m mal im Sinne der wachsenden und n mal im Sinne der abnehmenden Größen η_0 überschreitet, führt zu dem um

$$2(m-n)\pi i$$

vermehrten ursprünglichen Functionalwerthe, der dem $(m-n)^{\text{ten}}$ Zweige angehört, wenn der Hauptzweig der nullte heißt.

*) Es ist besonders der Hauptwerth von

$$\log 1 = 0, \quad \log(-1) = i\pi, \quad \log e = 1, \quad \log e^n = n,$$

$$\log i = \frac{1}{2}i\pi, \quad \log(-i) = -\frac{1}{2}i\pi, \quad \log e^x = x.$$

Es ist noch interessant, die Beziehung der in dem einzelnen Zweige befindlichen Werthe des Logarithmus zu den Variablenwerthen aufzusuchen, wie sie bei der geometrischen Betrachtung sich präsentirt.

Wenn man in $y = \log x$ alle möglichen Werthe beilegt, so werden die zugehörigen y -Werthe eines Zweiges nur einen Parallelstreifen in der y -Ebene ausfüllen, und zwar entsprechen den unendlich vielen Werthen des Logarithmus an einer Stelle x unendlich viele Punkte y , die in den unendlich vielen Parallelstreifen homolog liegen.

Einem Kreise $|x| = r$ entspricht in dem einzelnen Streifen eine Folge von Punkten gleichen reellen Bestandtheiles usw.

§ 48. Die allgemeine Potenz.

Den bisher behandelten Functionalgleichungen

$$f(x).f(y) = f(xy), \quad f(x) + f(y) = f(xy)$$

in der Form sehr nahe verwandte sind die folgenden

$$f(x).f(y) = f(xy), \quad f(x) + f(y) = f(x + y).$$

Wir wissen bereits, daß es analytische Functionen mit einer der hier ausgesprochenen Eigenschaften gibt, denn die ganzzahlige Potenz a^n genügt nicht allein der Rechnungsregel

$$a^m . a^n = a^{m+n},$$

sondern es war andererseits

$$x^m . y^m = (xy)^m;$$

und ferner ist $f = ax$ eine analytische Function, welche der zweiten Functionalgleichung genügt, denn es ist .

$$ax + ay = a(x + y).$$

Suchen wir zunächst die allgemeinste Function, welche der zweiten Gleichung entspringt, so haben wir anzusetzen, daß einmal

$$f(x) = \sum_{v=0}^{\infty} a_v (x - x_0)^v$$

ist. Doch weil $f(0) = 0$ sein muß, existirt auch eine Entwicklung:

$$f(x) = \sum_{v=1}^{\infty} c_v x^v,$$

und nun gibt die Substitution in die Functionalgleichung die Identität:

$$\sum_{v=1}^{\infty} c_v (x + y)^v = \sum_{v=1}^{\infty} c_v x^v + \sum_{v=1}^{\infty} c_v y^v.$$

Da die hier nothwendigen Beziehungen

$$c_v + c_{v+1} \binom{v+1}{1} x + c_{v+2} \binom{v+2}{2} x^2 + \dots = c_v \quad (v = 1, 2, \dots)$$

lehren, daß nur c_1 von Null verschieden sein kann, haben wir bereits die allgemeinste Function der verlangten Art in $f(x) = ax$ angegeben.

Für die der ersten Functionalgleichung genügende Function ergeben sich zunächst die folgenden Eigenschaften:

$$\begin{aligned} f(x) \cdot f\left(\frac{1}{x}\right) &= f(1) = 1, & f\left(\frac{1}{x}\right) &= \frac{1}{f(x)}, \\ f(x_1 \cdot x_2 \dots x_n) &= f(x_1) \cdot f(x_2) \dots f(x_n), \\ (f(x))^n &= f(x^n), & \frac{1}{f(x)^n} &= f\left(\frac{1}{x^n}\right) = f(x^{-n}) = (f(x))^{-n}, \end{aligned}$$

wo n ganzzahlig ist.

Setzt man

$$f(x) = \sum_{v=0}^{\infty} a_v (x - x_0)^v$$

und bildet

$$\begin{aligned} f(x) &= f(x_0 + (x - x_0)) = f(x_0) \cdot f\left(1 + \frac{x - x_0}{x_0}\right) \\ &= f(x_0) \sum_{v=0}^{\infty} a_v x_0^v \left(\frac{x - x_0}{x_0}\right)^v, \end{aligned}$$

so wird für $x = x_0$ $a_0 = 1$, und wenn man wie früher $a_v x_0^v = c_v$ und für $\frac{x - x_0}{x_0} = x$ setzt, wird

$$f(1 + x) = 1 + \sum_{v=1}^{\infty} c_v x^v \quad \text{und} \quad f(x) = 1 + \sum_{v=1}^{\infty} c_v (x - 1)^v.$$

Weil endlich

$$f(1 + x + y) = f(1 + x) \cdot f\left(1 + \frac{y}{1 + x}\right)$$

ist, besteht die Beziehung:

$$1 + \sum_{v=1}^{\infty} c_v (x + y)^v = \left(1 + \sum_{v=1}^{\infty} c_v x^v\right) \cdot \left(1 + \sum_{v=1}^{\infty} c_v \frac{y^v}{(1 + x)^v}\right)$$

und hierin ist der Coefficient von y^v linkerseits

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} c_{v+\mu} \binom{v+\mu}{\mu} x^\mu,$$

rechterseits hingegen

$$c_v \left(1 + \sum_{v=1}^{\infty} c_v x^v\right) \cdot \left(1 + \binom{v}{1} x + \binom{v}{2} x^2 + \dots\right)$$

oder bis auf den Factor c_v

$$\begin{aligned} &1 + \left(c_1 - \frac{v}{1}\right)x + \left(c_2 - c_1 \frac{v}{1} + \frac{v(v+1)}{1 \cdot 2}\right)x^2 + \dots \\ &\dots + \left(c^\mu - c_{\mu-1} \frac{v}{1} + c_{\mu-2} \frac{v(v+1)}{1 \cdot 2} - \dots + (-1)^\mu \frac{v(v+1) \dots (v+\mu-1)}{1 \cdot 2 \dots \mu}\right)x^\mu + \dots \end{aligned}$$

Darnach wird

$$c_{\nu+1} \binom{\nu+1}{1} = c_{\nu} \left(c_1 - \frac{\nu}{1} \right)$$

$$c_{\nu+2} \binom{\nu+2}{2} = c_{\nu} \left(c_2 - c_1 \frac{\nu}{1} + \frac{\nu(\nu+1)}{1 \cdot 2} \right)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$c_{\nu+\mu} \binom{\nu+\mu}{\mu} = c_{\nu} \left(c_{\mu} - c_{\mu-1} \frac{\nu}{1} + c_{\mu-2} \frac{\nu(\nu+1)}{1 \cdot 2} - \dots + (-1)^{\mu} \frac{\nu(\nu+1) \dots (\nu+\mu-1)}{1 \cdot 2 \dots \mu} \right).$$

Schreibt man wieder anstatt c_1 c , so geben diese Beziehungen für $\nu = 1$ der Reihe nach die Formeln:

$$c_2 = \frac{c(c-1)}{1 \cdot 2}, \quad c_3 = \frac{c(c-1)(c-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \dots$$

$$c_{\mu} = \frac{c(c-1)(c-2) \dots (c-\mu+1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \dots \mu}.$$

Diese Ausdrücke, welche wieder aus c so zusammengesetzt sind wie die Binomialcoefficienten, auf daß wir

$$c_{\mu} = \binom{c}{\mu}$$

setzen können, erfüllen die früheren Gleichungen mit einem beliebigen Werthe ν identisch, d. h. die Coefficienten sind bereits allen Forderungen gemäß bestimmt. —

Das verlangte Functionenelement lautet nunmehr:

$$f(x) = 1 + \sum_{\nu=1}^{\infty} \binom{c}{\nu} (x-1)^{\nu}$$

und es ist auch:

$$f(1+x) = \sum_{\nu=0}^{\infty} \binom{c}{\nu} x^{\nu}$$

und in der Umgebung einer Stelle x_0 besitzt $f(x)$ die Darstellung

$$f(x) = f(x_0) \sum_{\nu=0}^{\infty} \binom{c}{\nu} \left(\frac{x-x_0}{x_0} \right)^{\nu}.$$

wo nun $\binom{c}{0}$ für 1 gesetzt ist.

Weil $f(1+x)$ für ganze positive und negative und auch für gebrochene Zahlengrößen c gerade mit $(1+x)^c$ übereinstimmt, bezeichnet man die hier definirte Function allgemein mit

$$f(1+x) = (1+x)^c \quad \text{und} \quad f(x) = x^c$$

und nennt sie die *allgemeine Potens*. In diesem Zeichen lautet die Functionalgleichung

$$x^c \cdot y^c = (xy)^c.$$

Zur näheren Untersuchung der allgemeinen Potenz bringen wir dieselbe mit dem Logarithmus in nahe Verbindung.

Indem man die Gleichung

$$f(x) \cdot f(y) = f(x \cdot y)$$

logarithmirt, d. h.

$$\log (f(x) \cdot f(y)) = \log f(x) + \log f(y) = \log f(xy)$$

bildet, — was functionentheoretisch keiner Erläuterung mehr bedarf, da man in einer convergenten Potenzreihe die unabhängige Variable durch eine Potenzreihe in einer neuen Variablen ersetzen darf, — so erscheint $\log f(x)$ als eine Function, welche der Fundamenteigenschaft des Logarithmus theilhaftig ist. Man kann deshalb

$$\log f(x) = \varphi(x) = c \log x$$

und

$$f(x) = e^{c \log x}$$

setzen, wo unter $\log x$ zunächst der Hauptwerth des Logarithmus von x zu verstehen ist. Die Function $f(x)$ genügt der Differentialgleichung

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{c}{x} f(x),$$

wobei $x = 1$ und $f(x) = 1$ zusammengehörige Werthe sind. Diese Differentialgleichung kann man durch die beiden nachstehenden ersetzen:

$$\frac{dx}{dt} = x \quad \text{und} \quad \frac{dy}{dt} = cy$$

und dann hat man $t = 0$ $x = 1$, $y = 1$ zuzuordnen.

Für ganzzahlige Werthe von c gilt

$$f(x) = e^{c \log x} = (e^{\log x})^c = x^c$$

d. h. $f(x)$ wird eine ganze rationale und eindeutige Function. Gibt man $\log x$ irgend einen seiner Werthe

$$\text{Log } x + 2n\pi i,$$

so bleibt $e^{c \log x}$ immer ungeändert, weil $e^{2m\pi i} = 1$ ist.

In dem allgemeinen Falle schreiben wir $f(x)$ auch als eine Potenz

$$f(x) = x^c,$$

deren Ableitung

$$\frac{dx^c}{dx} = cx^{c-1}$$

ist, und verstehen unter x^c umgekehrt diejenige Function, welche in der Umgebung der Stelle x_0 die Darstellung zuläßt:

$$x^c = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{c^\nu}{\nu!} \left\{ \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu-1}}{\mu} \left(\frac{x-x_0}{x_0} \right)^\mu \right\}^\nu.$$

Ordnet man diese Reihe nach Potenzen von $(x - x_0)$, so findet man wieder die frühere Potenzreihe

$$x^c = x_0^c \sum_{\mu=0}^{\infty} \binom{c}{\mu} \left(\frac{x-x_0}{x_0} \right)^\mu$$

und diese wird gewifs so lange convergiren, als

$$|x - x_0| < |x_0|.$$

Die allgemeine Potenz hat demnach auch die singuläre Stelle $x=0$. Ist c eine ganze negative Zahl $-m$, so wird x^{-m} die ausserwesentlich singuläre Stelle $x=0$ besitzen, aber sonst überall regulären Verhaltens sein. Ist c eine rationale gebrochene Zahlengröfse $\frac{m}{n}$, die auf keine kleinere Benennung zu bringen ist, so wird

$$f(x) = x^{\frac{m}{n}} = e^{\frac{m}{n} \log x}$$

n deutig, denn wenn man für $\log x$ der Reihe nach alle Werthe setzt, so kann man neben dem Hauptwerthe der Potenz: $e^{\frac{m}{n} \log \text{nat } x} = x^{\frac{m}{n}}$ nur die weiteren $(n-1)$ verschiedenen Werthe:

$$e^{\frac{m}{n} 2k\pi i} x^{\frac{m}{n}} \quad (k = 1, 2, \dots, n-1)$$

auffinden, indem

$$e^{\frac{m}{n} 2(k+n)\pi i} = e^{\frac{m}{n} 2k\pi i}$$

ist. Der Functionalgleichung zufolge ist

$$\left(x^{\frac{m}{n}}\right)^n = x^m$$

und darum ist $x^{\frac{m}{n}}$ auch als die durch die algebraische Gleichung

$$y^n - x^m = 0$$

definirte algebraische Function y mit der $(n-1)$ fachen Verzweigungsstelle $x=0$ aufzufassen.

Haben in dieser Gleichung m und n den gemeinsamen Theiler k und ist $n = \nu k$, $m = \mu k$, so hat die algebraische Function wohl n Werthe, aber die $\left(\frac{m}{n}\right)^{\text{te}}$ Potenz von x nur ν Werthe, man darf daher — wie wir schon früher sahen — die n^{te} Wurzel aus der m^{ten} Potenz von x nicht ausnahmslos als gebrochene Potenz hinstellen.

Wir geben hier gelegentlich die n Lösungen der Gleichung

$$y^n = 1$$

oder die n Wurzeln aus der Einheit an. Sie lauten offenbar

$$1, e^{\frac{2\pi i}{n}}, e^{\frac{4\pi i}{n}}, \dots, e^{\frac{2(n-1)\pi i}{n}}$$

oder

$$\cos \frac{2k\pi}{n} + i \sin \frac{2k\pi}{n} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n-1)$$

und sie sind als Potenzen einer einzigen $e_x = e^{\frac{2\pi i}{n}}$ darzustellen, wo x und n relativ prim sind, indem

$$\varepsilon_x, \varepsilon_x^2, \dots, \varepsilon_x^{n-1}, \quad \varepsilon_x^n = \varepsilon_x^0 = 1$$

verschieden ausfallen und die n^{ten} Potenzen dieser Größen offenbar den Werth Eins annehmen. Wäre nämlich

$$\varepsilon_x^{\nu_1 + \nu_2} = \varepsilon_x^{\nu_2},$$

und hierin ν_2 und $\nu_1 + \nu_2$ kleiner als n , so müßte $\varepsilon_x^{\nu_1} = 1$ sein, und das ist nach den über x und ν_1 gemachten Festsetzungen unmöglich. Man nennt eine solche Wurzel ε_x eine *primitive n^{te} Einheitswurzel*.

Ist endlich in der Potenz x^c eine irrationale oder complexe Zahlengröße, so wird die Potenz unendlich vieldeutig, denn den zwei zu einem Werthe von x gehörigen Werthen des Logarithmus von x :

$$\log x + 2m\pi i \quad \text{und} \quad \log x + 2n\pi i$$

entsprechen verschiedene Werthe

$$e^{c(\log x + 2m\pi i)}, \quad e^{c(\log x + 2n\pi i)},$$

indem in

$$e^{2c(m-n)\pi i}$$

$c(m-n)$ keine reelle ganze Zahl sein kann.

Ist c eine beliebige Größe, deren absoluter Betrag größer wird als irgend eine vorgegebene Größe, und bildet man

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{x}{c}\right)^c &= e^{c \log \left(1 + \frac{x}{c}\right)} = e^c \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu-1}}{\mu} \left(\frac{x}{c}\right)^{\mu} \\ &= e^{\frac{x}{c}} \sum_{\mu=2}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu}}{\mu} \frac{x^{\mu}}{c^{\mu-1}}, \end{aligned}$$

so ist in dem Gültigkeitsbereiche dieser Identität der absolute Betrag der Summe

$$\sum_{\mu=2}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu}}{\mu} \left(\frac{x}{c}\right)^{\mu} c$$

für unendlich große c kleiner als jede beliebig kleine vorgegebene Größe und daher kann man setzen:

$$\left(\left(1 + \frac{x}{c}\right)^c\right)_{|c|=\infty} = e^x.$$

Wenn wir bei jedem Werthe von m

$$e^{m \log a} = (e^{\log a})^m = a^m$$

setzen können, wollen wir auch die Exponentialfunction e^{cx} auf die Form einer Potenz a^x bringen. Indem wir $c = \log a$ setzen, wird

$$e^{\log a \cdot x} = a^x$$

und die diese Function definirende Reihe lautet:

$$1 + \frac{x \log a}{1} + \frac{(x \log a)^2}{2!} + \dots$$

und die Ableitung ist:

$$\frac{da^x}{dx} = \log a \cdot a^x = ce^{cx}.$$

Für den Logarithmus von a darf man jeden beliebigen Werth seiner Werthe wählen, daher wird die Exponentialfunction a^x erst bestimmt sein, wenn $\log a$ festgesetzt ist.

Werfen wir noch einen Blick auf die Umkehrfunctionen der Functionen $y = \sin x$, $\cos x$, $\operatorname{tg} x$, $\operatorname{cotg} x$, die als rationale Functionen der Exponentialfunction eingeführt waren, so ist klar, daß jene als Logarithmen algebraischer Functionen von y erscheinen müssen.

Es war z. B.

$$y = \operatorname{tg} x = i \frac{1 - e^{2ix}}{1 + e^{2ix}},$$

und weil nun

$$e^{2ix} = \frac{1 + iy}{1 - iy}$$

ist, wird

$$x = -\frac{i}{2} \log \left(\frac{1 + iy}{1 - iy} \right) = \frac{i}{2} \log \left(\frac{1 - iy}{1 + iy} \right).$$

Bemerkt man, daß neben

$$\log(1 + s) = \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\mu-1}}{\mu} s^{\mu}$$

die Darstellungen

$$\log(1 - s) = -\sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{s^{\mu}}{\mu} \quad \text{und} \quad \log\left(\frac{1+s}{1-s}\right) = 2 \sum_{\mu=0}^{\infty} \frac{s^{2\mu+1}}{2\mu+1}$$

gelten, so folgt für die Umkehrfunction der Tangente von x in der Umgebung der Stelle $y = 0$ die Darstellung:

$$x = y - \frac{y^3}{3} + \frac{y^5}{5} - \frac{y^7}{7} + \dots$$

Die durch dieses Element definirte Function, die *Arcustangente* von y heißt, ist unendlich vieldeutig und zwar gehen alle Werthe aus einem ersten hervor, indem man diesen um ganze Vielfache von π vermehrt. Da $\operatorname{arctg} y$ der Differentialgleichung genügt

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{1+y^2},$$

wobei $y = 0$ und $x = 0$ zugeordnete Werthe sind, wird diese Function überall regulären Verhaltens sein außer an den Unendlichkeitsstellen von $(1+y^2)^{-1}$, d. h. an den Stellen $y = \pm i$. Dasselbe Resultat ergibt sich aus der Bemerkung, daß

$$\operatorname{arctg} y = \frac{1}{2} i \log \left(\frac{1 - iy}{1 + iy} \right)$$

an denjenigen Stellen nicht regulär ist, für welche das Argument des Logarithmus verschwindet oder unendlich ist.

Für $\operatorname{arctg} y$ muß sich deshalb in der Umgebung der Stelle $y = \infty$ eine Entwicklung angeben lassen, die nur positive ganze Potenzen von $\left(\frac{1}{y}\right)$ enthält. Das ist wirklich der Fall, denn wenn man

$$\operatorname{arctg} y = \frac{1}{2} i \log \left(\frac{-\frac{i}{y} - 1}{-\frac{1}{y} + 1} \right) = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} i \log \left(\frac{1 + \frac{i}{y}}{1 - \frac{i}{y}} \right)$$

setzt, wo $\frac{\pi}{2}$ der dem $(-1)^{\text{ten}}$ Zweige angehörige Werth von $\frac{i}{2} \log(-1)$ ist, so führt die Anwendung der früheren Formel für $\log\left(\frac{1+z}{1-z}\right)$ zu der Darstellung:

$$\operatorname{arctg} y = \frac{\pi}{2} - \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{y^3} \frac{1}{3} + \frac{1}{y^5} \frac{1}{5} - \dots \right).$$

Zieht man nun die Umkehrfunction von

$$y = \cotg x = i \frac{e^{2ix} + 1}{e^{2ix} - 1},$$

die *Arcuscotangente* von y , in Betracht, so findet man mit Hilfe der Gleichung

$$e^{2ix} = \frac{iy - 1}{iy + 1}$$

$$\operatorname{arc} \cotg y = \frac{1}{2i} \log \left(\frac{iy - 1}{iy + 1} \right) = \frac{\pi}{2} - \frac{i}{2} \log \left(\frac{1 - iy}{1 + iy} \right),$$

wo $\frac{\pi}{2}$ den Hauptwerth von $\frac{1}{2i} \log(-1)$ bezeichnet. Jetzt folgt die Beziehung

$$\operatorname{arctg} y + \operatorname{arc} \cotg y = \frac{\pi}{2},$$

deren entsprechende für die Umkehrfunctionen des Sinus und Cosinus schon oben abgeleitet wurde.

Wegen dieser Relationen, denen die Gleichungen

$$\sin x = \cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right), \quad \cos x = \sin\left(\frac{\pi}{2} - x\right)$$

$$\operatorname{tg} x = \cotg\left(\frac{\pi}{2} - x\right), \quad \cotg x = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - x\right)$$

zugehören, haben wir nur nöthig die Umkehrfunction je einer der Functionen \sin und \cos oder tg und \cotg zu untersuchen, die unter dem Namen der *trigonometrischen Functionen* zusammengefaßt werden.

Für die Function $\operatorname{arctg} y$ sind die Stellen $y = +i, -i$ Verzweigungsstellen, und in dem durch diese Ausnahmestellen begrenzten Continuum ist die Function durchaus stetig, nur der einzelne Zweig wird außer diesen Stellen längs einer von $+i$ nach $-i$ führenden Linie, welche nicht zwei oder mehrere Continua vollständig begrenzt, unstetig sein, derart, daß der Functionalwerth des Zweiges bei Überschreiten dieser Linie um die Gröfse π wächst oder abnimmt.

Bei der hier genannten Linie, welche der von der Stelle Null nach $-\infty$ führenden Unstetigkeitslinie des Zweiges des Logarithmus entspricht, haben wir einer grossen Willkür Raum gelassen, da man — wie früher hervorgehoben wurde — auch die Unstetigkeitslinie des Logarithmus verschiedenartig wählen kann.

Die Umkehrfunction von

$$y = \sin x = \frac{1}{2i}(e^{xi} - e^{-xi}),$$

für die wir schon ein Element aufgestellt haben, läßt sich wegen der Gleichung

$$e^{2ix} - 2iy e^{xi} - 1 = 0$$

durch die Formel

$$x = \arcsin y = -i \log(iy \pm \sqrt{1 - y^2})$$

definiren.

Da wir die algebraische Function $iy \pm \sqrt{1 - y^2}$ und den Logarithmus vollständig kennen gelernt haben, sind wir auch im Stande, die neue Function $\arcsin y$ zu untersuchen. Wir stehen davon ab und verweisen auf eine ausführliche Darlegung ihrer Eigenschaften in Thomae's Functionentheorie auf Seite 102 ff.

§ 49. Der Cosinus und Sinus ganzzahliger Vielfacher des Argumentes.

Wir wollen an die Untersuchung der allgemeinen Potenz die Ableitung einiger späterhin nothwendiger Ausdrücke für

$$\cos nx \quad \text{und} \quad \sin nx$$

anschliessen.

Da

$$e^{nxi} = \cos nx + i \sin x = (e^{xi})^n = (\cos x + i \sin x)^n$$

$$e^{-nxi} = \cos nx - i \sin x = (e^{-xi})^n = (\cos x - i \sin x)^n$$

ist, wird

$$\cos nx = \frac{1}{2} ((\cos x + i \sin x)^n + (\cos x - i \sin x)^n)$$

$$\sin nx = \frac{1}{2i} ((\cos x + i \sin x)^n - (\cos x - i \sin x)^n).$$

Bezeichnet n irgend eine endliche Zahlengröße, so kann man $\frac{\cos nx}{\cos^n x}$

und $\frac{\sin nx}{\cos^n x}$ in dem durch die Bedingung $|\operatorname{tg} x| < 1$ definirten Bereiche

um die Stelle $x = 0$ in eine Potenzreihe nach Potenzen von $\operatorname{tg} x$ entwickeln, denn daselbst wird man die in den Ausdrücken:

$$\cos nx = \frac{1}{2} \cos^n x ((1 + i \operatorname{tg} x)^n + (1 - i \operatorname{tg} x)^n)$$

$$\sin nx = \frac{1}{2} \cos^n x ((1 + i \operatorname{tg} x)^n - (1 - i \operatorname{tg} x)^n)$$

auf tretenden n^{ten} Potenzen der Binome $1 \pm i \operatorname{tg} x$ in der genannten Weise darstellen können. Weil $\operatorname{tg} x = 1$ ist, sobald

$$\sin x = \cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) = \cos x$$

wird, so sieht man, daß $x = \pm \frac{\pi}{4}$ die der Stelle $x = 0$ nächstliegenden Stellen sind, für die die in Rede stehende Darstellung zu existiren aufhört.

Setzt man voraus, daß n nur eine ganze Zahl sei, so werden $\cos nx$ und $\sin nx$ als rationale Functionen von $\cos x$ und $\sin nx$ auszudrücken sein, und zwar gilt:

$$\begin{aligned} \cos nx &= \cos^n x - \binom{n}{2} \cos^{n-2} x \sin^2 x + \binom{n}{4} \cos^{n-4} x \sin^4 x - \dots \\ &\quad + \begin{cases} \pm \sin^n x \\ \pm \binom{n}{n-1} \cos x \sin^{n-1} x \end{cases} \\ \sin nx &= \binom{n}{1} \cos^{n-1} x - \binom{n}{3} \cos^{n-3} x \sin^3 x + \binom{n}{5} \cos^{n-5} x \sin^5 x - \\ &\quad \dots + \begin{cases} \mp \binom{n}{n-1} \cos x \sin^{n-1} x \\ \pm \sin^n x, \end{cases} \end{aligned}$$

je nachdem $n \equiv 0, 2, 1, 3 \pmod{4}$ ist.

Ersetzt man $\cos^2 x$ durch $1 - \sin^2 x$, so erhalten diese Formeln die Gestalt:

$$\begin{aligned} \cos nx &= \cos 2\nu x = (1 - \sin^2 x)^\nu - \binom{n}{2} (1 - \sin^2 x)^{\nu-1} \sin^2 x + \\ &\quad + \binom{n}{4} (1 - \sin^2 x)^{\nu-2} \sin^4 x - \dots + (-1)^\nu \sin^n x \\ \cos nx &= \cos(2\nu+1)x = \cos x \left[(1 - \sin^2 x)^\nu - \binom{n}{2} (1 - \sin^2 x)^{\nu-1} \sin^2 x + \right. \\ &\quad \left. + \binom{n}{4} (1 - \sin^2 x)^{\nu-2} \sin^4 x - \dots + (-1)^\nu \binom{n}{n-1} \sin^{n-1} x \right] \\ \sin nx &= \sin 2\nu x = \cos x \left[\binom{n}{1} (1 - \sin^2 x)^{\nu-1} \sin x - \right. \\ &\quad \left. - \binom{n}{3} (1 - \sin^2 x)^{\nu-2} \sin^3 x + \dots + (-1)^{\nu-1} \binom{n}{n-1} \sin^{n-1} x \right] \\ \sin nx &= \sin(2\nu+1)x = \binom{n}{1} (1 - \sin^2 x)^\nu \sin x - \binom{n}{3} (1 - \sin^2 x)^{\nu-1} \sin^3 x + \\ &\quad \dots + (-1)^\nu \sin^n x. \end{aligned}$$

Entwickelt man die rechten Seiten nach steigenden Potenzen von $\sin x$, ersetzt aber den Binomialcoefficienten

$$\binom{\nu - \kappa}{\mu} \quad \text{durch} \quad \binom{\frac{n-2\kappa}{2}}{\mu},$$

so kann man den Coefficienten von $(-1)^\mu \sin^{2\mu} x$ in dem Ausdrucke für $\cos 2\nu x$ auf die folgende Form bringen:

$$\frac{n(n-2)\dots(n-2\mu+2)}{1.3\dots 2\mu-1} \left[\frac{(2\mu-1)(2\mu-3)\dots 3.1}{2.4\dots (2\mu-2)2\mu} + \frac{(2\mu-1)(2\mu-3)\dots 3}{2.4\dots (2\mu-2)} \frac{n-1}{2} \right. \\ \left. + \frac{(2\mu-1)(2\mu-3)\dots 5}{2.4\dots (2\mu-4)} \frac{(n-1)(n-3)}{2.4} + \dots + \frac{(n-1)(n-3)\dots (n-2\mu+1)}{2.4\dots 2\mu} \right]$$

und wenn man in der KlammergröÙe für $(2\mu-1)$ a und für $(n-1)$ b schreibt, erscheint diese in der übersichtlichen Gestalt:

$$\frac{a(a-2)\dots(a-2\mu+2)}{2.4\dots 2\mu} + \frac{a(a-2)\dots(a-2\mu+4)}{2.4\dots (2\mu-2)} \frac{b}{2} + \frac{a(a-2)\dots(a-2\mu+6)}{2.4\dots (2\mu-4)} \frac{b(b-2)}{2.4} \\ + \dots + \frac{a}{2} \frac{b(b-2)\dots(b-2\mu+4)}{2.4\dots (2\mu-2)} + \frac{b(b-2)\dots(b-2\mu+2)}{2.4\dots 2\mu} = \\ = \frac{(a+b)(a+b-2)\dots(a+b-2\mu+2)}{2.4\dots 2\mu}.$$

Die Anwendung dieser von Cauchy benützten Hilfsformel*), die man leicht bestätigen kann, führt auf die Darstellungen:

$$\cos nx = \cos 2\nu x = 1 - \frac{n^2}{2!} \sin^2 x + \frac{n^2(n^2-2^2)}{4!} \sin^4 x - \frac{n^2(n^2-2^2)(n^2-4^2)}{6!} \sin^6 x \\ + \dots + (-1)^{\frac{n}{2}} \frac{n^2(n^2-2^2)\dots(n^2-(n-2)^2)}{n!} \sin^n x \\ \cos nx = \cos(2\nu+1)x = \cos x \left[1 - \frac{n^2-1^2}{2!} \sin^2 x + \frac{(n^2-1^2)(n^2-3^2)}{4!} \sin^4 x - \right. \\ \left. \dots + (-1)^{\frac{n-1}{2}} \frac{(n^2-1^2)(n^2-3^2)\dots(n^2-(n-2)^2)}{(n-1)!} \sin^{n-1} x \right] \\ \sin nx = \sin 2\nu x = \cos x \left[\frac{n}{1} \sin x - \frac{n(n^2-2^2)}{3!} \sin^3 x + \frac{n(n^2-2^2)(n^2-4^2)}{5!} \sin^5 x \right. \\ \left. - \dots + (-1)^{\frac{n-2}{2}} \frac{n(n^2-2^2)(n^2-4^2)\dots(n^2-(n-2)^2)}{(n-1)!} \sin^{n-1} x \right] \\ \sin nx = \sin(2\nu+1)x = \frac{n}{1} \sin x - \frac{n(n^2-1^2)}{3!} \sin^3 x + \frac{n(n^2-1^2)(n^2-3^2)}{5!} \sin^5 x - \\ \dots + (-1)^{\frac{n-1}{2}} \frac{n(n^2-1^2)(n^2-3^2)\dots(n^2-(n-2)^2)}{n!} \sin^n x.$$

Setzt man an Stelle des Argumentes x $\left(\frac{\pi}{2} - x\right)$ ein und bemerkt, daß

*) Siehe Algebraische Analysis (deutsche Ausgabe von C. Itzigsohn) Cap. 4 § 3.

$$\cos 2\nu \left(\frac{\pi}{2} - x \right) = (-1)^\nu \cos 2\nu x,$$

$$\cos (2\nu + 1) \left(\frac{\pi}{2} - x \right) = (-1)^\nu \sin (2\nu + 1)x,$$

$$\sin 2\nu \left(\frac{\pi}{2} - x \right) = (-1)^{\nu+1} \sin 2\nu x,$$

$$\sin (2\nu + 1) \left(\frac{\pi}{2} - x \right) = (-1)^\nu \cos (2\nu + 1)x$$

ist, so erhält man noch die Formeln:

$$(-1)^{\frac{n}{2}} \cos nx = (-1)^\nu \cos 2\nu x = 1 - \frac{n^2}{2!} \cos^2 x + \frac{n^2(n^2-2^2)}{4!} \cos^4 x - \\ - \frac{n^2(n^2-2^2)(n^2-4^2)}{6!} \cos^6 x + \dots$$

$$(-1)^{\frac{n-1}{2}} \cos nx = (-1)^\nu \cos (2\nu + 1)x \\ = \sin x \left[1 - \frac{n^2-1^2}{2!} \cos^2 x + \frac{(n^2-1^2)(n^2-3^2)}{4!} \cos^4 x - \dots \right]$$

$$(-1)^{\frac{n+2}{2}} \sin nx = (-1)^{\nu+1} \sin 2\nu x \\ = \sin x \left[\frac{n}{1} \cos x - \frac{n(n^2-2^2)}{3!} \cos^3 x + \frac{n(n^2-2^2)(n^2-4^2)}{5!} \cos^5 x - \dots \right]$$

$$(-1)^{\frac{n-1}{2}} \sin nx = (-1)^\nu \sin (2\nu + 1)x \\ = \frac{n}{1} \cos x - \frac{n(n^2-1^2)}{3!} \cos^3 x + \frac{n(n^2-1^2)(n^2-3^2)}{5!} \cos^5 x - \dots$$

Man sieht also, daß $\cos 2\nu x$ und $\sin (2\nu + 1)x$ als rationale Functionen von $\cos x$ oder $\sin x$ allein darzustellen sind. Das Umgekehrte findet nicht statt, vielmehr ergibt sich $\cos x$ und $\sin x$ aus den Gleichungen als die Wurzel einer Gleichung n^{ten} Grades, die wir später angeben werden.

Anhang.

In diesem Capitel sei nur noch einer wichtigen Reihe Erwähnung gethan, welche eine analytische Function definirt, die alle durch unsere Functionalgleichungen bestimmten transcendenten Functionen: die Exponentialfunction, den Logarithmus und die allgemeine Potenz umfaßt. Diese Reihe lautet:

$$\mathfrak{P}(x) = 1 + \frac{\alpha}{1} \frac{\beta}{\gamma} x + \frac{\alpha(\alpha+1)}{1.2} \frac{\beta(\beta+1)}{\gamma(\gamma+1)} x^2 + \frac{\alpha(\alpha+1)(\alpha+2)}{1.2.3} \frac{\beta(\beta+1)(\beta+2)}{\gamma(\gamma+1)(\gamma+2)} x^3 + \\ + \dots = \sum_{\nu=0}^{\infty} a_\nu x^\nu,$$

wo die Constanten α, β, γ der Bedingung genügen müssen, daß die Größen

$$\left| \frac{a_\nu}{a_{\nu+1}} \right| = \left| \frac{\gamma + (\gamma+1)\nu + \nu^2}{\alpha\beta + (\alpha+\beta)\nu + \nu^2} \right| \quad (\nu = 0, 1, 2, \dots)$$

nicht unter jede angebbare GröÙe herabsinken, denn andernfalls hätte die Potenzreihe keinen Convergencebereich.

Bezeichnet man die durch das angegebene Element definirte analytische Function mit

$$y = F(\alpha, \beta, \gamma, x),$$

so wird zunächst bei unendlich großem $|\beta|$

$$e^x = F\left(1, \beta, 1, \frac{x}{\beta}\right),$$

denn der Coefficient von $\frac{x^\nu}{\nu!}$, nämlich $(\beta(\beta+1)\dots(\beta+\nu-1)\beta^{-\nu})$ wird Eins. Ferner ist

$$\log(1+x) = x F(1, 1, 2, -x)$$

$$\log\left(\frac{1+x}{1-x}\right) = 2x F\left(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, x^2\right)$$

$$(1+x)^a = F(-a, \beta, \beta, -x)$$

usw. Die Frage nach Functionen bestimmter Art, die in $F(\alpha, \beta, \gamma, x)$ enthalten sind, z. B. den algebraischen Functionen, und eine solche ist ja bereits bei geeignetem a in $(1+x)^a$ angeführt, stellt man passend dort, wo $F(\alpha, \beta, \gamma, x)$ durch eine übersichtliche Functionalgleichung definirt ist, in die vielleicht auch die Ableitungen von y nach x eintreten. Man wird also zur Untersuchung der Function $F(\alpha, \beta, \gamma, x)$ besser daran thun, wenn man an der Hand des Elementes zunächst die Differentialgleichung aufsucht, welcher dieselbe genügt.

Bildet man die Ableitungen:

$$\frac{dy}{dx} = \alpha \frac{\beta}{\gamma} F(\alpha+1, \beta+1, \gamma+1, x) = \alpha \frac{\beta}{\gamma} F_1$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \alpha(\alpha+1) \frac{\beta(\beta+1)}{\gamma(\gamma+1)} F(\alpha+2, \beta+2, \gamma+2, x) = \alpha(\alpha+1) \frac{\beta(\beta+1)}{\gamma(\gamma+1)} F_2$$

und allgemein:

$$\frac{d^n y}{dx^n} = \alpha(\alpha+1)\dots(\alpha+n-1) \frac{\beta(\beta+1)\dots(\beta+n-1)}{\gamma(\gamma+1)\dots(\gamma+n-1)} F(\alpha+n, \beta+n, \gamma+n, x),$$

so findet man leicht die von Gaußs angegebene Beziehung zwischen F , F_1 und F_2 bestätigt:

$$\gamma(\gamma+1)F - (\gamma+1)(\gamma - (\alpha+\beta+1)x)F_1 - (\alpha+1)(\beta+1)x(1-x)F_2 = 0$$

und wegen dieser Identität besteht für y die Differentialgleichung:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{\gamma - (\alpha+\beta+1)x}{x(1-x)} \frac{dy}{dx} - \frac{\alpha\beta}{x(1-x)} y = 0,$$

die nach der Substitution $\frac{dy}{dx} = y_1$ durch das canonische System zu ersetzen ist:

$$\frac{dx}{dt} = x(1-x), \quad \frac{dy}{dt} = x(1-x)y_1,$$

$$\frac{dy_1}{dt} = (\gamma - (\alpha + \beta + 1)x)y_1 - \alpha\beta y,$$

dem man nun leicht die singulären Stellen für jede particuläre Integralfunction, die von der Zuordnung der Anfangswerthe von x , y , y_1 zu $t = 0$ abhängt, entnehmen kann. Man sieht, daß y als Function von x überall regulären Verhaltens sein wird, ausgenommen an den Stellen $x = 0, 1, \infty$, wenngleich daselbst für besondere Integralfunctionen y auch convergente Potenzreihen:

$$x^{\alpha_1} \mathfrak{P}(x), \quad (x-1)^{\alpha_2} \mathfrak{P}(x-1), \quad \left(\frac{1}{x}\right)^{\alpha_3} \mathfrak{P}\left(\frac{1}{x}\right)$$

existiren können, wobei die Größen $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ nur specielle Werthe haben dürfen.*)

*) Es ist hier nicht der Raum, diese wichtige Differentialgleichung zu untersuchen, ich verweise deshalb den Leser auf die Originalabhandlungen von:

Gauß: Disquisitiones generales circa seriem infinitam.

Riemann: Beiträge zur Theorie der durch die Gaußsche Reihe $F(\alpha, \beta, \gamma, x)$ darstellbaren Functionen (ges. Werke).

Schwarz: Zur Theorie der hypergeometrischen Reihe (Journal für reine und angewandte Mathematik Bd. 75).

Sechstes Capitel.

Darstellung der eindeutigen analytischen Functionen einer Veränderlichen.

§ 50. Einleitung.

Darstellung der ganzen transcendenten Function durch Producte.

Darstellung jeder Function mit einer wesentlich singulären Stelle.

Eine eindeutige analytische Function einer Veränderlichen mit bloß außerwesentlich singulären Stellen war stets als Quotient ganzer rationaler Functionen darstellbar; eine eindeutige Function, die im Endlichen überall regulären Verhaltens ist und die einzige (wesentlich) singuläre Stelle ∞ hat, konnte man durch eine beständig convergente Potenzreihe definiren usw.

Darnach liegt die Frage nahe, ob man auch die arithmetische Abhängigkeit des Werthes einer eindeutigen Function von dem Werthe der Variablen angeben kann, wenn für die Function singuläre Stellen in beliebiger Anzahl vorgelegt sind.

Diese Frage ist für die neuere Functionentheorie charakteristisch, indem sie zwischen dem Euler'schen Functionenbegriff, der mit dem Begriff des arithmetischen Ausdruckes zusammenfällt, und dem von Cauchy auf die Stetigkeit gestützten Begriff einer Function vermittelnd eintritt; sie definiert die analytische Function durch ein System ineinander fortsetzbarer Potenzreihen und lehrt hinterher, wie man den arithmetischen Ausdruck einer solchen Function einheitlich bestimmt, wenn ihre Unstetigkeitsstellen gegeben sind.

Die Grundlage für die Beantwortung der betreffs der eindeutigen Function einer Variablen gestellten Aufgabe bietet die Darstellung der ganzen Function mit unendlich vielen Nullstellen als Product von Factoren, die nur an einer Stelle verschwinden und die Darstellung einer Function mit unendlich vielen singulären Stellen, die eine Grenzstelle c haben, als Summe von Functionen, deren jede außer an der hier auftretenden wesentlich singulären Stelle c nur an einer der gegebenen Stellen irregulären Verhaltens ist. —

Bevor wir aber die Bestimmung einer ganzen rationalen Function mit vorgeschriebenen Nullstellen $a_1, a_2, \dots a_n$ und einem bestimmten Werthe A an einer von den a_v verschiedenen Stellen x_0 in der Form

$$G(x) = A \cdot \frac{\prod_{v=1}^n (x - a_v)}{\prod_{v=1}^n (x_0 - a_v)}$$

auf den Fall einer ganzen transcendenten Function ausdehnen, für die unendlich viele Nullstellen vorgegeben sind, müssen wir einige Bemerkungen über unendliche Producte analytischer Functionen $f_v(x)$ vorausschicken.

Angenommen, daß jede der Functionen $f_v(x)$ auf die Form gebracht sei:

$$1 + \varphi_v(x),$$

so wissen wir, daß

$$F(x) = \prod_{v=1}^{\infty} (1 + \varphi_v(x))$$

nur dann an einer Stelle x_0 convergirt, wenn auch

$$\sum_{v=1}^{\infty} \varphi_v(x_0)$$

endlich ist. Damit also das Product eine Bedeutung habe, ist nothwendig, daß die Functionen $\varphi_v(x)$ einen gemeinsamen Convergenzbereich besitzen und $\sum_{v=1}^{\infty} \varphi_v(x)$ wenigstens in einem Theile dieses Bereiches convergirt.

Wir sind aber nicht im Stande zu zeigen, daß das Product eine analytische Function darstellt, wenn wir nicht auch annehmen, daß diese Summe $\sum_{v=1}^{\infty} \varphi_v(x)$ in einem Bereiche (A) gleichmäßig convergirt. Dann aber convergirt das Product gleichmäßig, ist daselbst stetig und definirt eine analytische Function; d. h. man kann dann nach Annahme einer Größe ε eine solche ganze Zahl n finden, daß der absolute Betrag des Productes

$$\prod_{v=m}^{m+m'} f_v(x) \quad \text{und} \quad \prod_{v=m}^{\infty} f_v(x)$$

für jedes m' und ein $m > n$ und jede Stelle des Bereiches (A) von Eins um weniger abweicht als ε anzeigt, und ferner wird $F(x)$ in gewisser Nähe jeder in dem Bereiche (A) liegenden Stelle a der Bedingung

$$|F(x) - F(a)| < \varepsilon$$

genügen und endlich durch eine Potenzreihe darstellbar sein.

Obwohl die gleichmäßige Convergenz einer Reihe $\sum_{v=1}^{\infty} \varphi_v(x)$ noch nicht die der unbedingten Convergenz nach sich zieht, womit nicht behauptet ist, daß wirklich gleichmäßig convergente Reihen existiren, die nicht auch unbedingt convergent sind, setzen wir bei dem Beweise voraus, daß diese Reihe gleichmäßig und unbedingt convergire.

Dann kann man ein n so angeben, daß nicht allein für jedes $m > n$

$$\left| \sum_{v=m}^{\infty} \varphi_v(x) \right| < \delta, \text{ sondern auch } \sum_{v=m}^{\infty} |\varphi_v(x)| < \delta$$

wird. Bezeichnet man hierauf

$$\prod_{v=m}^{\infty} (1 + \varphi_v(x)) = 1 + S_m \quad \text{und} \quad \prod_{v=m}^{\infty} (1 + |\varphi_v(x)|) = 1 + S'_m$$

(wo die $|\varphi_v(x)| < 1$ seien), so wird

$$\begin{aligned} \left| \prod_{v=m}^{\infty} (1 + \varphi_v(x)) \right| &= |1 + S_m| \leq 1 + |S_m| < 1 + S'_m = \\ &= \prod_{v=m}^{\infty} (1 + |\varphi_v(x)|) < \frac{1}{1 - \sum_{v=m}^{\infty} |\varphi_v(x)|} \end{aligned}$$

und man sieht, daß unser Product wirklich unbedingt und gleichmäßig convergirt. Dasselbe definirt aber auch eine analytische Function, denn wenn man

$$\begin{aligned} 1 + \varphi_v(x) \quad \text{durch} \quad e^{\varphi_v(x) - \frac{1}{2} \varphi_v^2(x) + \frac{1}{3} \varphi_v^3(x) - \dots} = \\ = e^{\varphi_v(x) \cdot \psi_v(x)} = e^{\text{Log}(1 + \varphi_v(x))} \end{aligned}$$

ersetzt und beachtet, daß keine der Functionen $\psi_v(x)$ in dem Bereiche (A) einen gewissen angebbaren Betrag g überschreitet, so ist

$$\left| \sum_{v=m}^{\infty} \varphi_v(x) \psi_v(x) \right| \leq \sum_{v=m}^{\infty} |\varphi_v(x) \psi_v(x)| \leq g \sum_{v=m}^{\infty} |\varphi_v(x)|,$$

und weil $\sum \varphi_v(x)$ eine analytische Function darstellt, muß auch $\sum \varphi_v(x) \psi_v(x)$ und

$$e^{\sum \varphi_v(x) \psi_v(x)} = \prod (1 + \varphi_v(x))$$

eine analytische Function definiren und darstellen.

Nach diesen Vorbemerkungen denken wir eine ganze transcendente Function gegeben, die unendlich viele Nullstellen besitzt (wie z. B. $\sin x$ oder $\cos x$).

Innerhalb eines endlichen Bereiches kann nur eine endliche Anzahl von Nullstellen liegen, — wobei wir eine Nullstelle als n fach

zählen, wenn die Function nebst ihren ersten $n - 1$ Ableitungen daselbst verschwindet, — denn andernfalls gäbe es eine Grenzstelle, in deren Umgebungen unendlich viele Nullstellen enthalten wären und die ganze Function müßte identisch Null sein.

Ebensowenig wird irgend eine eindeutige Function in einem endlichen Bereiche, der keine wesentliche singuläre Stelle umfaßt, an unendlich vielen Stellen denselben Werth A annehmen. Damit leuchtet ein, daß man die Nullstellen einer ganzen Function $G(x)$

$$a_1, a_2, \dots a_\nu \dots$$

stets den Bedingungen gemäß ordnen kann:

$$|a_{\nu+1}| \geq |a_\nu|, \quad \lim_{\nu=\infty} |a_\nu| = \infty.$$

Ist nun eine solche Reihe von Stellen gegeben, so fragen wir, ob es stets eine ganze transcendente Function gibt, welche an diesen Stellen verschwindet.

Diese Frage wird man unbedingt bejahen müssen, aber es wird sich herausstellen, daß die ganze transcendente nicht so wie die ganze rationale Function bloß bis auf eine Constante, sondern bis auf eine im Endlichen nirgends verschwindende ganze Function bestimmt ist.

Wir wollen zunächst an einem Beispiel ersehen, um was es sich bei Construction einer Function mit vorgegebenen Nullstellen überhaupt handelt und zwar an demjenigen, welches Herrn Weierstraß den Schlüssel zur Lösung gegeben zu haben scheint. Die Reihe der Nullstellen sei

$$-1, -2, \dots -\nu, \dots$$

dann kann das Product

$$\prod_{\nu=0}^{\infty} \left(1 + \frac{x}{\nu}\right)$$

nicht convergent sein, weil $\sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu}$ divergirt. Bildet man aber nach Gauss' Vorgang das Product:

$$\begin{aligned} \frac{1}{n^x} \prod_{\nu=1}^n \left(1 + \frac{x}{\nu}\right) &= \Psi(n, x) \\ &= \frac{\left(1 + \frac{x}{1}\right)}{2^x} \frac{\left(1 + \frac{x}{2}\right)}{3^x} \dots \frac{\left(1 + \frac{x}{n}\right)}{(n+1)^x} \cdot \frac{(n+1)^x}{n^x} \\ &= \frac{\left(1 + \frac{x}{1}\right)}{\left(1 + \frac{1}{1}\right)^x} \frac{\left(1 + \frac{x}{2}\right)}{\left(1 + \frac{1}{2}\right)^x} \dots \frac{\left(1 + \frac{x}{n}\right)}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^x} \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right)^x, \end{aligned}$$

und stellt man den einzelnen Factor in der Umgebung der Stelle $x=0$ durch die Potenzreihe dar:

$$\left(1 + \frac{x}{\nu}\right) \left(1 - \frac{x}{\nu} + \frac{x(x+1)}{1 \cdot 2} \frac{1}{\nu^2} - \dots\right) = \left(1 - \frac{x(x+1)}{1 \cdot 2} \frac{1+X_\nu}{\nu^2}\right),$$

wo $|X_\nu|$ bei hinlänglich grossen Werthen von ν beliebig klein zu machen ist, so wird

$$\lim_{\nu=\infty} \Psi(n, x) = \prod_{\nu=1}^{\infty} \left(1 + \frac{x}{\nu}\right) \left(1 + \frac{1}{\nu}\right)^{-x},$$

und nach der Substitution:

$$\left(1 + \frac{1}{\nu}\right)^{-x} = e^{-x \operatorname{Log} \left(1 + \frac{1}{\nu}\right)}$$

wird

$$\lim_{n=\infty} \Psi(n, x) = \prod_{\nu=1}^{\infty} \left(1 + \frac{x}{\nu}\right) \cdot e^{-x \operatorname{Log} \frac{\nu+1}{\nu}}.$$

Dieses Product convergirt in einem endlichen Bereiche um die Stelle $x=0$ unbedigt und gleichmässig, denn die Summe

$$\sum_{\nu=m}^{\infty} \left| \frac{1+X_\nu}{\nu^2} \right|$$

kann kleiner gemacht werden als eine beliebig kleine Grösse δ .

Bringt man noch die Summe

$$\sum_{\nu=m}^n \operatorname{Log} \frac{\nu+1}{\nu}$$

mit den ersten n Gliedern der *harmonischen Reihe* in Vergleich und setzt

$$\begin{aligned} c_n &= \sum_{\nu=1}^n \left(\frac{1}{\nu} - \operatorname{Log} \frac{\nu+1}{\nu} \right) = \sum_{\nu=1}^n \frac{1}{\nu^2} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \frac{1}{\nu} + \frac{1}{4} \frac{1}{\nu^2} - \dots \right) \\ &= \sum_{\nu=1}^n \frac{\delta_\nu}{\nu^2}, \end{aligned}$$

wo δ_ν eine positive Grösse kleiner als Eins ist, auf dass

$$c = \lim_{n=\infty} c_n = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{\delta_\nu}{\nu^2} \quad \text{zugleich mit} \quad \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu^2}$$

convergirt, so kann man auch bei unendlich grossem n

$$-\sum_{\nu=1}^n \operatorname{Log} \frac{\nu+1}{\nu} = -\sum_{\nu=1}^n \frac{1}{\nu} + c_n,$$

• und hierauf

$$\lim_{n=\infty} \Psi(n, x) = e^{cx} \prod_{\nu=1}^{\infty} \left(1 + \frac{x}{\nu}\right) \cdot e^{-\frac{x}{\nu}}$$

setzen.

Dieses Product ist beständig convergent und definirt eine ganze Function mit den vorgegebenen Nullstellen $-\nu$; sie heisst *Factorielle* von x und wird mit $Fc(x)$ bezeichnet.

Die Constante c besitzt den angenäherten Werth:

$$0,57721\ 56649\ 01532\ 86060\ \dots$$

und führt den Namen der Mascheroni'schen Constanten.

An diesem Beispiele bemerken wir, daß das Product ganzer transcenderter Functionen

$$\left(1 + \frac{x}{\nu}\right) \cdot e^{-\frac{x}{\nu}},$$

deren jede nur eine im Endlichen gelegene Nullstelle und im Unendlichen eine wesentlich singuläre Stelle besitzt, die verlangte ganze transcendente Function liefert, und damit ist man zu der Vermuthung geführt, daß die ganze Function mit unendlich vielen Nullstellen a_ν , der oben besagten Beschaffenheit als beständig convergentes unendliches Product ganzer transcenderter Functionen darzustellen sei, die nur je eine der Nullstellen besitzen.*) Diese Functionen

$$\left(1 - \frac{x}{a_\nu}\right) \cdot e^{g_\nu(x)},$$

wo $g_\nu(x)$ eine ganze Function bezeichnet, heißen *Primfunctionen*, weil sie den Primfactoren der ganzen rationalen Function entsprechen.

Bildet man eine Reihe von Primfunctionen:

$$E(x, 0) = 1 - x, \quad E(x, 1) = (1 - x) \cdot e^x, \quad E(x, 2) = (1 - x) \cdot e^{x + \frac{x^2}{2}}, \\ \dots E(x, m) = (1 - x) \cdot e^{x + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 + \dots + \frac{1}{m}x^m},$$

und stellt mit Hilfe der in dem Einheitskreise gültigen Entwicklung

$$\log(1 - x) = -\sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{x^\mu}{\mu} + 2n\pi i$$

und

$$1 - x = e^{-\sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{x^\mu}{\mu}}$$

$E(x, m)$ für alle der Bedingung $|x| < 1$ genügenden x -Werthe in der Form

$$E(x, m) = e^{-\sum_{\mu=m+1}^{\infty} \frac{x^\mu}{\mu}} = e^{-\sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{x^{m+\mu}}{m+\mu}}$$

dar und wählt für die dieser Primfunction entsprechende Function mit der von Null verschiedenen Nullstelle a_ν :

*) Siehe Weierstrass, Functionenlehre p. 16 u. s. f.

$$E\left(\frac{x}{a_v}, m_v\right) = \left(1 - \frac{x}{a_v}\right) \cdot e^{\sum_{\mu=1}^{m_v} \frac{1}{\mu} \left(\frac{x}{a_v}\right)^\mu},$$

wo m_v eine ganze Zahl bezeichnet, innerhalb des Bereiches, wo

$$\left|\frac{x}{a_v}\right| < 1$$

ist, die Darstellung

$$E\left(\frac{x}{a_v}, m_v\right) = e^{-\sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{1}{m_v + \mu} \left(\frac{x}{a_v}\right)^{m_v + \mu}},$$

so läßt sich leicht beurtheilen, wenn das unendliche Product

$$\prod_{v=0}^{\infty} E^{n_v}\left(\frac{x}{a_v}, m_v\right)$$

eine ganze transcendente Function mit den n_v -fachen Nullstellen a_v definirt.

Gibt man x einen Werth, dessen absoluter Betrag kleiner ist als $|a_{n+1}|$, so ist zunächst nachzusehen, ob in dem Producte

$$\prod_{v=1}^n E^{n_v}\left(\frac{x}{a_v}, m_v\right) \cdot \prod_{v=n+1}^{\infty} E^{n_v}\left(\frac{x}{a_v}, m_v\right)$$

der zweite Factor, der innerhalb des Bereiches $\left|\frac{x}{a_{n+1}}\right| < 1$ die Darstellung

$$e^{-\sum_{v=n+1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{n_v}{m_v + \mu} \left(\frac{x}{a_v}\right)^{m_v + \mu}}$$

gestattet, unbedingt und gleichmäfsig convergiren kann. Dazu ist nothwendig, dafs die unendliche Summe

$$\sum_{v=n+1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{n_v}{m_v + \mu} \left|\frac{x}{a_v}\right|^{m_v + \mu}$$

convergirt, und das wird der Fall sein, wenn die Reihe von gröfserer Summe

$$\sum_{v=n+1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} n_v \left|\frac{x}{a_v}\right|^{m_v + \mu} = \sum_{v=n+1}^{\infty} \frac{n_v}{1 - \left|\frac{x}{a_v}\right|} \left|\frac{x}{a_v}\right|^{m_v + 1}$$

oder wenn gar die Reihe:

$$N \left|\frac{x}{k}\right| \sum_{v=n+1}^{\infty} \left|\frac{1}{a_v} \left(\frac{x}{a_v}\right)^{m_v}\right|$$

endlich ist, wo k den kleinsten der Werthe $1 - \left|\frac{x}{a_v}\right|$ $v=1, n+2, \dots$

und N die gröfste der ganzen Zahlen n_v bezeichnet.

Wählt man deshalb die ganzen Zahlen m_ν so, daß die Summe

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \left| \frac{x^{m_\nu}}{a_\nu^{m_\nu+1}} \right|$$

beständig convergirt — und das ist zweifellos möglich, denn die durch die besondere Festsetzung $m_\nu = \nu - 1$ entstehende Summe:

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \left| \frac{1}{a_\nu} \left(\frac{x}{a_\nu} \right)^{\nu-1} \right|$$

ist endlich —, so wird das Product

$$\prod_{\nu=n+1}^{\infty} E^{n_\nu} \left(\frac{x}{a_\nu}, m_\nu \right)$$

für alle Stellen des Bereiches $\left| \frac{x}{a_{n+1}} \right| < 1$ unbedingt aber auch gleichmäfsig convergiren, denn nach Annahme einer beliebig kleinen Gröfse δ kann man ein $\nu = n$ so angeben, daß jedes Product

$$\prod_{\nu=n'}^{\infty} E^{n_\nu} \left(\frac{x}{a_\nu}, m_\nu \right) \quad (n' > n)$$

in demjenigen Bereiche um die Stelle Null, wo $|x| = \xi$ kleiner ist als ein beliebig großer Betrag r , von der Einheit um eine Gröfse q_n abweicht, deren Betrag wieder kleiner ist als δ .

Ist nämlich $|a_{n+1}| < r$, so wird in dem Bereiche $|x| \leq r$

$$E^{n_\nu} \left(\frac{x}{a_\nu}, m_\nu \right) = e^{-\sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{n_\nu}{m_\nu + \mu} \left(\frac{x}{a_\nu} \right)^{m_\nu + \mu}},$$

sobald nur $\nu > n$ ist, und das Product $\prod_{\nu=n}^{\infty} E^{n_\nu} \left(\frac{x}{a_\nu}, m_\nu \right)$ erfüllt dann die genannte Forderung, indem bei wachsendem n die Summe

$$\sum_{\nu=n+1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{n_\nu}{m_\nu + \mu} \left| \frac{x}{a_\nu} \right|^{m_\nu + \mu}$$

zugleich mit

$$\lim_{n=\infty} \sum_{\nu=n+1}^{\infty} \left| \frac{1}{a_\nu} \left(\frac{x}{a_\nu} \right)^{m_\nu} \right|$$

unendlich klein d. h. auch kleiner als δ wird.

Das unendliche Product läßt sich aber auch durch eine äquivalente beständig convergente Potenzreihe ersetzen.

Stellt man die innerhalb des Bereiches $|x| < |a_{n+1}|$ unbedingt und gleichmäfsig convergente Doppelsumme

$$\sum_{\nu=n+1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{n_\nu}{m_\nu + \mu} \left(\frac{x}{a_\nu} \right)^{m_\nu + \mu}$$

durch eine Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x, n+1)$$

dar, indem man die gleichnamigen Glieder zusammenzieht, so werden in dem Bereiche $|x| < |a_1|$ gewiß alle Potenzreihen

$$\mathfrak{P}(x, \nu) \quad (\nu = 1, 2, \dots, n+1, \dots)$$

convergiren, und zwar gilt daselbst die Beziehung:

$$\mathfrak{P}(x, 1) - \mathfrak{P}(x, n+1) = \sum_{\nu=1}^n \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{n_{\nu}}{m_{\nu} + \mu} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right)^{m_{\nu} + \mu},$$

doch weil die Primfunction $E\left(\frac{x}{a_{\nu}}, m_{\nu}\right)$ durch die Reihe

$$-\sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{1}{m_{\nu} + \mu} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right)^{m_{\nu} + \mu}$$

dargestellt wird, kann man

$$e^{-\mathfrak{P}(x, 1) + \mathfrak{P}(x, n+1)} = \prod_{\nu=1}^n E^{n_{\nu}}\left(\frac{x}{a_{\nu}}, m_{\nu}\right)$$

oder

$$e^{-\mathfrak{P}(x, 1)} = \prod_{\nu=1}^n E^{n_{\nu}}\left(\frac{x}{a_{\nu}}, m_{\nu}\right) e^{-\mathfrak{P}(x, n+1)}.$$

setzen. Da man hierin jede Function E als ganze Function in eine beständig convergente Reihe $\mathfrak{P}_{\nu}(x)$ entwickeln kann und der Factor $e^{-\mathfrak{P}(x, n+1)}$ in dem Bereiche $\left|\frac{x}{a_{n+1}}\right| < 1$ durch eine convergente Reihe $\mathfrak{P}'(x, n+1)$ zu ersetzen ist, so wird die ganze rechte Seite in eine innerhalb dieses Bereiches convergente Potenzreihe $\bar{\mathfrak{P}}(x, n+1)$ zu transformiren sein. Der Ausdruck $e^{-\mathfrak{P}(x, 1)}$ ist zunächst nur durch eine in dem Bereiche $\left|\frac{x}{a_1}\right| < 1$ convergente Potenzreihe $\bar{\mathfrak{P}}(x, 1)$ zu ersetzen; doch weil diese Reihe daselbst mit der Reihe $\bar{\mathfrak{P}}(x, n+1)$ übereinstimmt, muß sie jedenfalls in der Umgebung der Stelle Null, wo $|x| < |a_{n+1}|$ ist, convergiren. Da wir endlich n so groß annehmen können als wir nur immer wollen, so wird die Reihe $\bar{\mathfrak{P}}(x, 1)$ für jeden noch so großen Werth von x convergiren und eine ganze Function $G(x)$ definiren. Diese Function besitzt zufolge der Gleichung:

$$G(x) = \prod_{\nu=1}^{\infty} E^{n_{\nu}}\left(\frac{x}{a_{\nu}}, m_{\nu}\right) e^{-\lim_{n=\infty} \mathfrak{P}(x, n+1)}$$

die Eigenschaft, an der Stelle a_{ν} mit der vorgeschriebenen Ordnungszahl n_{ν} zu verschwinden, den das Product enthält den Factor:

$$\left(1 - \frac{x}{a_{\nu}}\right)^{n_{\nu}}.$$

Wir bemerken noch, daß

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathfrak{P}(x, n+1) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{\nu=n+1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{n_{\nu}}{\mu + m_{\nu}} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right)^{m_{\nu} + \mu}$$

gleich Null zu setzen ist, und sagen: Die gegebene Reihe von Stellen

$$a_1, a_2, \dots, a_{\nu}, \dots$$

ist die Reihe von Nullstellen derjenigen ganzen Function, welche durch Entwicklung des Ausdruckes

$$e^{-\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{n_{\nu}}{m_{\nu} + \mu} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right)^{\mu}}$$

in eine Potenzreihe nach x entsteht, oder durch das unendliche Product

$$\prod_{\nu=1}^{\infty} \left(1 - \frac{x}{a_{\nu}}\right)^{n_{\nu}} e^{\sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{1}{\mu} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right)^{\mu}}$$

dargestellt wird. Multiplicirt man $G(x)$ noch mit x^{n_0} , so geht eine ganze Function hervor, die ausser den Nullstellen a_{ν} noch an der Stelle Null n_0 mal verschwindet.

Man kann also stets eine ganze Function mit vorgeschriebenen Nullstellen angeben, aber schon darum, weil die ganzen Zahlen m_{ν} gewissermaßen willkürlich geblieben sind, ist die Function nicht eindeutig bestimmt, und ferner ist das Product einer ersten ganzen Function $G_0(x)$ der verlangten Art und einer im Endlichen nicht verschwindenden ganzen Function

$$e^{g_0(x)}$$

— wo $g_0(x)$ selbst eine ganze Function bezeichnet — eine Function derselben Art.

Aber umgekehrt ist jede ganze Function mit den gegebenen Nullstellen in der Form

$$G(x) = G(x) e^{g_0(x)} = e^{g_0(x)} \prod_{\nu=1}^{\infty} \left(1 - \frac{x}{a_{\nu}}\right)^{n_{\nu}} e^{\sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{1}{\mu} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right)^{\mu}}$$

darstellbar, denn der Quotient zweier ganzer Functionen mit denselben n_{ν} fachen Nullstellen ist eine im Endlichen nirgends verschwindende und durchaus endliche, also ganze Function

$$\frac{G(x)}{G_0(x)} = G_1(x),$$

die stets auf die Form $e^{g_0(x)}$ gebracht werden kann.

In der That: bildet man die sogenannte logarithmische Ableitung von $G_1(x)$, d. i.

$$\frac{d \log G_1(x)}{dx} = \frac{1}{G_1} \frac{dG_1}{dx},$$

so ist diese wieder eine ganze Function $g_1(x)$, und wenn man der Stelle $x = 0$ den Anfangswerth $G_1(0)$ zuordnet, wird

$$G_1(x) = e^{g_0(x)}.$$

Darnach sind alle ganzen Functionen $G(x)$ mit den Nullstellen der einfachen Function $G_0(x)$ wirklich in der Formel

$$G_0(x) \cdot e^{g_0(x)}$$

enthalten, in der $e^{g_0(x)}$ der äußere Factor von $G(x)$ heißen möge.

Eine ganze Function ist somit in einer der drei Formen darstellbar:

$$e^{g(x)}, \quad x^{n_0} \prod_{\nu=1}^n \left(1 - \frac{x}{a_\nu}\right)^{n_\nu} e^{g_\nu(x)}, \quad x^{n_0} \prod_{\nu=1}^n E^{n_\nu} \left(\frac{x}{a_\nu}, m_\nu\right) e^{g(x)},$$

je nachdem sie keine, oder eine endliche oder unendliche Anzahl von Nullstellen besitzt. Wenn man die ganze Function

$$g(x) - g(0)$$

in eine unbedingt und gleichmäßig convergente Summe ganzer rationaler Functionen $g_\nu(x)$ zerlegt, die für $x = 0$ verschwinden, und

$$n_\nu \sum_{\mu=1}^{m_\nu} \frac{1}{\mu} \left(\frac{x}{a_\nu}\right)^\mu + g_\nu(x) \quad \text{mit} \quad g_\nu(x),$$

$$e^{g(0)} \quad \text{mit} \quad C$$

bezeichnet, so wird das beständig unbedingt und gleichmäßig convergente Product in das Product der Primfunctionen

$$\left(1 - \frac{x}{a_\nu}\right)^{n_\nu} e^{g_\nu(x)}$$

und eines Factors $C \cdot x^{n_0}$ übergehen.

Die Willkürlichkeit, die bei der Construction einer ganzen Function mit vorgegebenen Nullstellen übrig bleibt, liegt in der Wahl der Constanten C und gewissermaßen in der der rationalen Functionen $g_\nu(x)$. —

Eine eindeutige Function, welche überall mit Ausnahme der Stelle c regulären Verhaltens ist, muß eine ganze Function von $\frac{1}{x-c}$ $G\left(\frac{1}{x-c}\right)$ sein, und diese kann nur unendlich viele Nullstellen

$$a_1, a_2, \dots, a_\nu, \dots$$

besitzen, wenn die Grenzstelle der a_ν die Stelle c ist, oder was dasselbe sagt, wenn man die Reihe der a_ν so ordnen kann, daß

$$|a_\nu - c| \leq |a_{\nu-1} - c| \quad \text{und} \quad \lim_{\nu=\infty} |a_\nu - c| = 0$$

wird.

Ist umgekehrt eine derartige Reihe von Stellen gegeben und nennt man jetzt Primfunction eine ganze Function von $\left(\frac{1}{x-c}\right)$, die nur an

einer Stelle a_v verschwindet, so gibt es wiederum eine durch ein Product solcher Primfactoren darstellbare ganze Function $G_0\left(\frac{1}{x-c}\right)$ mit den vorgegebenen Nullstellen.

Nimmt man zunächst an, daß keine der Nullstellen a_v Null oder unendlich ist, und bildet die Primfunctionen

$$E_v(x) = \left(1 - \frac{a_v - c}{x - c}\right)^{n_v} e^{n_v \sum_{\mu=1}^{m_v} \frac{1}{\mu} \left(\frac{a_v - c}{x - c}\right)^\mu},$$

entwickelt sie innerhalb des Bereiches

$$\left| \frac{a_v - c}{x - c} \right| < 1$$

in der Form

$$e^{-\sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{n_v}{m_v + \mu} \left(\frac{a_v - c}{x - c}\right)^\mu}$$

und wählt die ganzen Zahlen m_v derart, daß

$$\sum_{v=1}^{\infty} \left| (a_v - c) \left(\frac{a_v - c}{x - c}\right)^{m_v} \right|$$

für alle endlichen Werthe von $\frac{1}{x-c}$ endlich ist, dann ist das unendliche Product

$$\prod_{v=1}^{\infty} E_v^{n_v}(x)$$

die ganze Function $G_0\left(\frac{1}{x-c}\right)$ der verlangten Art.

Soll diese noch die n_0 fache Nullstelle $x=0$ haben, so tritt der Factor

$$\left(1 + \frac{c}{x - c}\right)^{n_0}$$

hinzu, und ist die Stelle ∞ n_0 fache Nullstelle, so erscheint auch der Factor

$$\left(\frac{\frac{1}{x}}{\frac{1}{x} - \frac{1}{c}}\right)^{n_0},$$

der für $c = \infty$ durch $\left(\frac{1}{x}\right)^{n_0}$ zu ersetzen ist.

Die hier besprochene Erweiterung bietet also gar keine Schwierigkeiten und man kann unmittelbar jede ganze Function $G\left(\frac{1}{x-c}\right)$ als Product von Primfunctionen

$$\left(1 - \frac{a_v - c}{x - c}\right)^{n_v} e^{n_v \left(\frac{1}{x-c}\right)}$$

darstellen, die nur eine Nullstelle a_v und eine wesentlich singuläre Stelle c besitzen.

In der Umgebung jeder Stelle x_0 , die nicht Nullstelle von $G\left(\frac{1}{x-c}\right)$ ist, wird die ganze Function durch eine innerhalb des Bereiches $\left|\frac{x-x_0}{c-x_0}\right| < 1$ convergente Potenzreihe $\mathfrak{P}(x-x_0)$ und in der durch die Bedingung $\left|\frac{1}{x}\right| < \left|\frac{1}{c}\right|$ definirten Umgebung der regulären Stelle $x = \infty$ durch eine Potenzreihe $\mathfrak{P}\left(\frac{1}{x}\right)$ darstellbar sein. In derjenigen Umgebung von $x = x_0$, welche keine Nullstelle von $G\left(\frac{1}{x}\right)$ enthält, kann man die ganze Function fernerhin auch durch eine Formel

$$e^{\mathfrak{P}(x-x_0)}$$

darstellen, indem daselbst

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dx}$$

in eine Potenzreihe zu entwickeln ist. Aber in der Umgebung einer Nullstelle a_v wird man den Quotienten

$$\frac{G\left(\frac{1}{x-c}\right)}{E_v^{n_v}(x)}$$

in eine Potenzreihe $\mathfrak{P}'(x-a_v)$ entwickeln können, und darum wird $G\left(\frac{1}{x-c}\right)$ daselbst durch eine Formel

$$\left(1 - \frac{x}{a_v}\right)^{n_v} e^{\mathfrak{P}(x-a_v)}$$

definirt werden, indem die Primfunction $E_v(x)$ in der Umgebung ihrer Nullstelle a_v durch eine Reihe derselben Gestalt

$$(x - a_v) \cdot e^{\mathfrak{P}_v(x-a_v)}$$

darstellbar ist. —

Aus den voranstehenden Sätzen kann man einen Schluss auf die *Darstellungsform jeder eindeutigen Function* ziehen, die in dem Bereiche der unbeschränkten variablen Gröfse x nur eine wesentlich singuläre Stelle c besitzt.

Hat die eindeutige Function keine von c verschiedene singuläre Stelle, so ist sie eine ganze Function des Argumentes $\frac{1}{x-c}$. Besitzt sie aber beliebig viele (eine endliche oder unendliche Anzahl) auferwesentlich singulärer Stellen

$$b_1, b_2, \dots, b_v, \dots$$

welche jedenfalls den Bedingungen:

$$|b_{v-1} - c| \geq |b_v - c|, \quad \lim |b_v - c| = 0$$

gemäß zu ordnen sind, so gibt es eine ganze Function $G_2\left(\frac{1}{x-c}\right)$, die an diesen Stellen in derselben Ordnung verschwindet, als die in Rede

stehende Function $F(x)$ dort unendlich wird. Das Product von $F(x)$ und $G_2\left(\frac{1}{x-c}\right)$ wird dann eine mit Ausnahme der Stelle c überall endliche und eindeutige Function $G_1\left(\frac{1}{x-c}\right)$ und darum nimmt $F(x)$ selbst die Gestalt an:

$$F(x) = \frac{G_1\left(\frac{1}{x-c}\right)}{G_2\left(\frac{1}{x-c}\right)} = e^{g(x)} \frac{\prod_{v=1}^{\infty} E^{n_v}(x, m_v)}{\prod_{v=1}^{\infty} E^{n'_v}(x, m'_v)}$$

d. h. die eindeutige Function mit der wesentlich singulären Stelle c ist durch den Quotienten zweier ganzer Functionen des Argumentes $\frac{1}{x-c}$ auszudrücken, von denen eine gewiß transcendent ist. Die Function G_2 muß dann transcendent sein, wenn $F(x)$ unendlich viele außerwesentlich singuläre Stellen besitzt.

Umgekehrt ist der Quotient zweier ganzer Functionen desselben Argumentes $\frac{1}{x-c}$, von denen beide oder bloß eine transcendent sei, eine eindeutige Function mit der wesentlich singulären Stelle c , denn wäre sie in der Umgebung von c durch ein Product:

$$\frac{1}{(x-c)^m} \mathfrak{P}(x-c)$$

darzustellen, so könnte weder G_1 noch G_2 transcendent sein.

Man kann aus der Darstellungsform von $F(x)$ entnehmen, daß diese Function in unendlich kleiner Umgebung ihrer wesentlich singulären Stelle c jedem Werthe beliebig nahe kommen kann.

Man bemerke zunächst, daß $|F(x)|$ für beliebig kleine Werthe von $|x-c|$ größer gemacht werden kann als eine beliebig vorgelegte GröÙe K . Wenn G_2 eine transcendente Function ist, so liegen in beliebiger Nähe von c Nullstellen dieser Function, an denen $F(x)$ unendlich groß wird. Ist aber G_2 eine ganze rationale Function, so bringe man den Quotienten auf die Form

$$\frac{G_1^{(1)} + G_2 G_1^{(2)}}{G_2},$$

wo auch $G_1^{(1)}$ eine ganze rationale Function, aber niedrigeren Grades als G_2 ist und $G_1^{(2)}$ eine ganze transcendente Function bedeutet. Dann wird $\frac{G_1^{(1)}}{G_2}$ für unendlich große Werthe des Argumentes $\frac{1}{x-c}$ unendlich klein und $|F(x)|$ in unendlich kleiner Umgebung von c unendlich groß.

Da endlich die eindeutigen Functionen

$$\frac{1}{F(x)} \quad \text{und} \quad \frac{1}{F(x) - C}$$

dieselbe wesentlich singuläre Stelle besitzen, so existiren in dem genannten Bereiche um c auch Stellen, wo

$$|F(x)| < \frac{1}{K} \quad \text{und} \quad |F(x) - C| < \frac{1}{K}$$

wird, womit die Behauptung erwiesen ist.

§ 51. Fortsetzung. Darstellung der trigonometrischen Functionen.

Wir kehren wieder zu unserer Function

$$G_0(x) = x^{n_0} \prod_{\nu=1}^{\infty} \left(1 - \frac{x}{a_\nu}\right)^{n_\nu} e^{\sum_{\mu=1}^{m_\nu} \frac{1}{\mu} \left(\frac{x}{a_\nu}\right)^\mu}$$

zurück und wollen sie — wie das bei der gleichmäßigen und unbedingten Convergenz des Productes erlaubt ist — ebenso wie das Product einer endlichen Anzahl von Factoren differentiiren. Es ist

$$\begin{aligned} \frac{1}{G_0} \frac{dG_0}{dx} &= \frac{d \log G_0}{dx} = \sum_{\nu=1}^{\infty} n_\nu \left(\frac{1}{x-a_\nu} + \frac{1}{a_\nu} + \frac{1}{a_\nu} \left(\frac{x}{a_\nu}\right) + \dots + \frac{1}{a_\nu} \left(\frac{x}{a_\nu}\right)^{m_\nu-1} \right) \\ &= \sum_{\nu=1}^{\infty} \left[\frac{d \log (x-a_\nu)^{n_\nu}}{dx} + \frac{n_\nu}{a_\nu} \left(1 + \frac{x}{a_\nu} + \dots + \left(\frac{x}{a_\nu}\right)^{m_\nu-1} \right) \right] \end{aligned}$$

und wir wissen, daß $\frac{d \log G_0}{dx}$ in der Umgebung jeder von den Nullstellen a_ν und der unendlich fernen Stelle verschiedenen Stelle regulären Verhaltens sein muß. *)

*) Man bemerkt, daß

$$\frac{G_0(x) \frac{dE\left(\frac{x}{a_\nu}, m_\nu\right)}{dx}}{E\left(\frac{x}{a_\nu}, m_\nu\right)}$$

für $x = a_\nu$ gleich $\left(\frac{dG_0}{dx}\right)_{x=a_\nu} = G_0'(a_\nu)$ und für $x = a_\nu$ Null wird. Deshalb stellt die Summe

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} n_\nu \frac{G_0(x)}{G_0'(a_\nu)} \frac{\frac{dE\left(\frac{x}{a_\nu}, m_\nu\right)}{dx}}{E\left(\frac{x}{a_\nu}, m_\nu\right)} e^{g_\nu(x) - g_\nu(a_\nu)}$$

eine ganze Function $G(x)$ dar, die an den unendlich vielen Nullstellen a_1, a_2, \dots die festgesetzten Werthe η_1, η_2, \dots annimmt.

Wann diese Summe beständig convergirt, wollen wir nicht untersuchen, denn es ist uns nur darum zu thun, die Erweiterung der Lagrange'schen Interpolationsformel anzudeuten.

Ist die Häufungsstelle der unendlich vielen Stellen, an denen eine ganze Function vorgegebene Werthe hat, nicht $x = \infty$, sondern $x = c$, so muß die Stelle c eine wesentlich singuläre Stelle der gesuchten Function sein, denn in

Setzen wir innerhalb des Bereiches $\left| \frac{x}{a_\nu} \right| < 1$

$$\frac{n_\nu}{x - a_\nu} = -\frac{n_\nu}{a_\nu} \left(1 - \frac{x}{a_\nu} + \dots + \left(\frac{x}{a_\nu} \right)^{m_\nu-1} \right) + \left(\frac{x}{a_\nu} \right)^{m_\nu} \frac{n_\nu}{x - a_\nu},$$

so wird die logarithmische Ableitung von G_0 auch durch die innerhalb des Bereiches $\left| \frac{x}{a_\nu} \right| < 1$ zweifellos convergente unendliche Summe rationaler Functionen

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \left(\frac{x}{a_\nu} \right)^{m_\nu} \frac{n_\nu}{x - a_\nu} \quad (\alpha)$$

definiert sein.

Sind a_1, a_2, \dots unendlich viele Stellen, von denen in einem endlichen Bereiche nur eine endliche Anzahl liegt, auf daß also

$$|a_{n+1}| > |a_n| \quad \text{und} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} |a_n| = \infty$$

ist, bezeichnen ferner n_ν endliche ganze Zahlen und m_ν derartige ganze Zahlen, daß die Summe

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \left| \frac{1}{a_\nu} \left(\frac{x}{a_\nu} \right)^{m_\nu} \right|$$

beständig convergirt, dann kann man für die voranstehende Summe (α) die gleichmäßige Convergenz in demjenigen Bereiche beweisen, der durch die Bedingungen charakterisirt wird:

$$|x| < R, \quad |a_{n+1}| > R > |a_n|, \quad |x - a_\nu| > \varrho, \quad (\nu = 1, 2, \dots, n),$$

wo R eine beliebig große aber endliche Größe ist und ϱ , beliebig klein sind.*)

Der genannte Bereich wird durch eine Kreisfläche um die Stelle $x=0$ gebildet, auf deren Grenze keine der Stellen a_ν liegt, aus deren Innerem aber beliebig kleine um die daselbst befindlichen Stellen (a_1, a_2, \dots, a_n) sich erstreckende Kreisflächen ausgeschlossen sind.

Wenn nach Annahme einer endlichen Größe R ein endliches $\nu = n$ gefunden ist, so daß

$$|a_n| < R < |a_{n+1}|,$$

so wird die Summe

$$\sum_{\nu=1}^n \left(\frac{x}{a_\nu} \right)^{m_\nu} \frac{n_\nu}{x - a_\nu}$$

innerhalb unseres Bereiches gewiß gleichmäßig convergiren und von der Summe

beliebig kleiner Umgebung der Häufungsstelle hat sie unendlich viele Werthe, unter denen beliebig kleine und beliebig große sein können.

*) Vergl. Cesaro, *Giornale di matematiche* 1885.

$$\sum_{\nu=n+1}^{\infty} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right)^{m_{\nu}} \frac{n_{\nu}}{x-a_{\nu}}$$

werden wir das auch behaupten können, wenn die Summe der absoluten Beträge der Summanden endlich ist.

Da aber

$$|x| < |a_{n+\nu}|, \quad |a_{n+\nu} - x| \geq |a_{n+\nu}| - |x| > 0$$

ist, so wird

$$\sum_{\nu=n+1}^{\infty} \left| \frac{x}{a_{\nu}} \right|^{m_{\nu}} \frac{n_{\nu}}{|a_{\nu} - x|} < \sum_{\nu=n+1}^{\infty} \left| \frac{x}{a_{\nu}} \right|^{m_{\nu}} \frac{n_{\nu}}{|a_{\nu}| - |x|} = \sum_{\nu=n+1}^{\infty} \left| \frac{1}{a_{\nu}} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right)^{m_{\nu}} \right| \frac{n_{\nu}}{1 - \left| \frac{x}{a_{\nu}} \right|}.$$

Heißt N wieder die größte der ganzen Zahlen n_{n+} , und ist die kleinste der Größen $1 - \left| \frac{x}{a_{\nu}} \right|$ K , so wird die letzte Summe kleiner als

$$\frac{N}{K} \sum_{\nu} \left| \frac{1}{a_{\nu}} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right)^{m_{\nu}} \right|$$

und damit ist die Behauptung der Voraussetzung zufolge bewiesen.

Es ist auch zu sehen, daß in eben demselben Bereiche gleichzeitig die neuen Summen

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right)^{m_{\nu}} \frac{n_{\nu}}{(x-a_{\nu})^k}$$

gleichzeitig convergiren, wenn k eine ganze Zahl bezeichnet. Denn nennt man die kleinste der Größen ϱ_{ν} ϱ , so ist an jeder Stelle unseres Bereiches

$$|a_{\nu} - x| > \varrho$$

und deshalb

$$\left| \frac{x}{a_{\nu}} \right|^{m_{\nu}} \frac{n_{\nu}}{|a_{\nu} - x|^k} < \frac{1}{\varrho^{k-1}} \left| \frac{x}{a_{\nu}} \right|^{m_{\nu}} \frac{n_{\nu}}{|a_{\nu} - x|},$$

womit der Satz einleuchtet.

Läßt sich den von Null verschiedenen Nullstellen a_{ν} unserer ganzen Function $G_0(x)$ eine ganze Zahl $m+1$ so zuordnen, daß

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \left| \frac{1}{a_{\nu}} \right|^{m+1}$$

endlich ist, so kann man offenbar allen Zahlen m_{ν} den Werth m beilegen, denn

$$\sum_{\nu} \left| \frac{1}{a_{\nu}} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right)^{m_{\nu}} \right| = |x^m| \sum_{\nu} \left| \frac{1}{a_{\nu}} \right|^{m+1}$$

wird für jeden endlichen Werth von x endlich bleiben. Dann convergiren aber auch die Summen

$$\sum_{\nu} \frac{n_{\nu}}{a_{\nu}^m (x-a_{\nu})} \quad \text{und} \quad \sum_{\nu} \frac{n_{\nu}}{a_{\nu}^m (x-a_{\nu})^k}$$

in dem früher genannten Bereiche gleichmäßig.

Nehmen wir von vornherein an, daß keine der den Nullstellen a_v zugeordneten ganzen Zahlen n_v eine endliche angebbare Zahl m übertrifft, so kommt man leicht zu dem Schlusse, es muß dann $\sum_v \left| \frac{1}{a_v} \right|^{m+1}$ endlich sein. In der That führt die m malige Differentiation der Gleichung:

$$\frac{d \log G_0}{dx} = \sum_{v=1}^{\infty} \left[\frac{d \log (x - a_v)^{n_v}}{dx} + \frac{n_v}{a_v} \left(1 + \frac{x}{a_v} + \dots + \left(\frac{x}{a_v} \right)^{m_v-1} \right) \right]$$

auf eine Summe:

$$\frac{d^{m+1} \log G_0}{dx^{m+1}} = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{d^{m+1} \log (x - a_v)^{n_v}}{dx^{m+1}} = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1} m! n_v}{(x - a_v)^{m+1}},$$

die in der Umgebung der nicht singulären Stelle $x = 0$ endlich sein soll, aber nicht endlich sein kann, wenn $\sum_{v=1}^{\infty} \left| \frac{1}{a_v} \right|^{m+1}$ nicht convergirt.

Laguerre nennt eine ganze transcendente Function $G_0(x)$ vom Range m , wenn für die Reihe ihrer Nullstellen m die kleinste ganze Zahl ist, für die $\sum_v \left| \frac{1}{a_v} \right|^{m+1}$ endlich ist. Darnach sind die Functionen

$$Fc(x), \quad \sin \pi x, \quad \cos \pi x$$

ganze Functionen ersten Ranges. Die Reihe der Nullstellen von $\sin \pi x$ und $\cos \pi x$ sind

$$0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad \text{beziehungsweise} \quad \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \pm \frac{5}{2}, \dots$$

und weil die Reihe

$$\sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v^2} \quad \text{und umsomehr} \quad \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{(2v+1)^2}$$

convergirt, kann man diese Functionen in der Form darstellen:

$$x \prod_{v=-\infty}^{+\infty} \left(1 - \frac{x}{v} \right) \cdot e^{\frac{x}{v}} \cdot e^{\gamma(x)}$$

$$\prod_{v=-\infty}^{+\infty} \left(1 - \frac{2x}{2v+1} \right) e^{\frac{2x}{2v+1}} e^{\gamma(x)}.$$

Doch müssen hier die *äußeren Factoren* $e^{\gamma(x)}$, $e^{\gamma(x)}$ noch passend bestimmt werden, damit die Producte gerade $\sin \pi x$ und $\cos \pi x$ und nicht bloß Functionen mit denselben Nullstellen definiren.

Zur Bestimmung dieses Factors dienen folgende allgemeine Betrachtungen.

Ist $0, a_1, a_2, \dots$ die Reihe der Nullstellen einer ganzen Function des m^{ten} Ranges und läßt man x unendlich zunehmen, ohne dabei den Bereich der gleichmäßigen Convergenz der Summe

$$\sum_v \frac{1}{a_v^m} \frac{n_v}{(x - a_v)}$$

zu verlassen, so kann das stets in solcher Weise geschehen, daß diese Summe und auch die der absoluten Beträge der Summanden nach Null convergirt.

Wir haben nur nöthig, die zweite Behauptung zu erweisen. Man kann stets ein $v = n$ so angeben, daß

$$\sum_{v=n+1}^{\infty} \frac{n_v}{|a_v^m| |a_v - x|}$$

kleiner wird als eine beliebige kleine Gröfse δ , und weil man in der somit bestehenden Ungleichung:

$$\sum_{v=n+1}^{\infty} \frac{n_v}{|a_v^m| |a_v - x|} < \sum_{v=1}^n \frac{n_v}{|a_v^m| |a_v - x|} + \delta$$

für die Summe der endlichen Anzahl von Gliedern nach Annahme einer kleinen Gröfse ε eine positive Gröfse ξ so bestimmen kann, daß für jedes x von größerem Betrage als ξ die Summe kleiner wird als ε , so convergirt die genannte Summe für unendlich wachsende Werthe von x unseres Bereiches nach Null.

Daraus folgt, daß die logarithmische Ableitung von $G_0(x)$ nach Multiplication mit x^{-m}

$$\frac{1}{x^m} \frac{d \log G_0}{dx} = \frac{n_0}{x^{m+1}} + \sum_{v=1}^{\infty} \frac{n_v}{a_v^m (x - a_v)}$$

mit unendlich wachsendem x nach Null convergirt.

Dasselbe gilt auch, wenn die ganze Function m^{ten} Ranges einen äußeren Factor $e^{g(x)}$ besitzt, in welchem die ganze rationale Function $g(x)$ den m^{ten} Grad nicht übersteigt.

Zur Charakterisirung der Convergenz der in Rede stehenden Summe nach Null, wenn x ohne eine singuläre Stelle a_v zu überschreiten, nach ∞ übergeht, mag hervorgehoben werden, daß das Product

$$x \sum_{v=1}^{\infty} \frac{n_v}{a_v^m (x - a_v)} = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{n_v}{a_v^m \left(1 - \frac{a_v}{x}\right)}$$

unter gleichen Umständen divergirt, indem nämlich die Summe:

$$\sum_v \frac{n_v}{|a_v^m| \left|1 + \frac{a_v}{x}\right|}$$

und umsomehr die Summe der absoluten Beträge $\frac{n_v}{|a_v^m| \left|1 - \frac{a_v}{x}\right|}$ mit $\sum_{v=1}^{\infty} \left|\frac{1}{a_v}\right|^m$ unendlich wird.

Durch ganz ähnliche Betrachtungen läßt sich zeigen, daß die Summen

$$\sum_v \frac{x^k}{a_v^m (x - a_v)^{k+1}}$$

mit wachsendem x nach Null, aber

$$\sum_v \frac{x^k}{a_v^m (x - a_v)^k}$$

nach Unendlich convergiren, und dann kann man sich überzeugen, daß gleichzeitig mit $x^{-m} \frac{d \log G_0}{dx}$ auch die Quotienten

$$\frac{G_0^{(\mu+1)}(x)}{x^m G_0^{(\mu)}(x)}$$

nach Null convergiren, wo $G_0^{(\mu)}(x)$ die μ^{te} Ableitung von $G_0(x)$ bezeichnet. Nun ist jede Ableitung einer ganzen Function wieder eine solche, und wenn man daher zeigen kann, daß eine an die Eigenschaften

$$\lim_{x=\infty} \left(\frac{G'(x)}{x^m G(x)} \right) = 0, \quad \lim_{x=\infty} \left(\frac{G'(x)}{x^{m-1} G(x)} \right) = \infty$$

geknüpfte ganze Function vom m^{ten} Range sein muß, hat man auch gezeigt, daß jede Ableitung einer ganzen Function des m^{ten} Ranges von demselben Range m ist.

Man sieht aber leicht, daß der Rang m' einer ganzen Function $G(x)$, welche die genannten Eigenschaften besitzt und deren zugeordnete Zahlen m_v höchstens den Werth m erhalten, nicht größer oder kleiner sein kann als m , weil im ersten Falle

$$x^{m'-m} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{n_v}{a_v^m (x - a_v)}$$

nicht nach Null convergiren und in dem zweiten Falle die zweite der oben genannten Bedingungen verletzt werden würde.

Da die Zahlen m_v aber auch nicht in's Unendliche zunehmen können, wie z. B. im allgemeinen Falle, wo wir $m_v = v - 1$ setzten, ist wirklich $G(x)$ vom m^{ten} Range. In dem äußeren Factor kann $G(x)$ natürlich den Grad m nicht übersteigen.

Sollten wir nunmehr bemerken, daß

$$\frac{1}{x} \frac{d \log \sin \pi x}{dx} = \frac{\pi}{x} \cotg \pi x = \frac{g'(x)}{x} + \frac{1}{x^2} + \sum_{v=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{v(x-v)}$$

für $x = \infty$ nach Null convergirt, so muß der äußere Factor in dem Producte für $\sin \pi x$ die Form

$$e^{ax+b}$$

besitzen. Nun ist

$$\frac{\pi}{x} \cotg \pi x = \frac{i\pi}{x} \cdot \frac{e^{2\pi xi} + 1}{e^{2\pi xi} - 1}$$

und wenn wir hier $x = \xi + i\eta$ nach Unendlich convergiren lassen, ohne die auf der reellen Axe liegenden Nullstellen von $\sin \pi x$ zu überschreiten, also z. B. dadurch, daß wir nur η nach $\pm \infty$ gehen lassen, so wird

$$\cotg \pi(\xi + i\eta) \text{ nach } \pm i \text{ und } \frac{\pi}{x} \cotg \pi x \text{ nach Null}$$

convergiren. — Wir setzen deshalb

$$\pi \cotg \pi x = a + \frac{1}{x} + \sum' \frac{x}{v(x-v)}$$

und weil

$$-\pi \cotg \pi x = a - \frac{1}{x} - \sum' \frac{x}{v(x-v)}$$

ist, folgt, daß $a = 0$ ist. Vergleicht man schliesslich die Entwicklungen von

$$\sin \pi x \text{ und } e^b x \prod' \left(1 - \frac{x}{v}\right) \cdot e^{\frac{x}{v}}$$

in der Umgebung der Stelle $x = 0$, so erkennt man, daß $e^b = \pi$ zu setzen ist und damit wird:

$$\sin \pi x = \pi x \prod'_{v=-\infty}^{+\infty} \left(1 - \frac{x}{v}\right) \cdot e^{\frac{x}{v}}$$

und entsprechend

$$\cos \pi x = \prod'_{v=-\infty}^{+\infty} \left(1 - \frac{2x}{2v+1}\right) \cdot e^{\frac{2x}{2v+1}}.$$

Daneben ist:

$$\sin \pi x = \pi x \prod_{v=1}^{\infty} \left(1 - \frac{x^2}{v^2}\right), \quad \cos \pi x = \prod_{v=1}^{\infty} \left(1 - \frac{4x^2}{(2v-1)^2}\right)$$

und

$$\begin{aligned} \pi \cotg \pi x &= \frac{1}{x} + \sum'_{v=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{x-v} + \frac{1}{v}\right) = \frac{1}{x} + \sum'_{v=-\infty}^{+\infty} \frac{x}{v(x-v)} \\ &= \frac{1}{x} + \sum'_{v=1}^{\infty} \frac{2x}{x^2 - v^2} = \frac{1}{x} + \sum'_{v=1}^{\infty} \left(\frac{1}{x-v} + \frac{1}{x+v}\right) \\ -\pi \tg \pi x &= \sum'_{v=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{x - \frac{2v+1}{2}} + \frac{1}{\frac{2v+1}{2}}\right) = \sum'_{v=-\infty}^{+\infty} \frac{4x}{(2v+1)(2x - (2v+1))} \\ &= \sum'_{v=1}^{\infty} \frac{2x}{x^2 - \left(\frac{2v-1}{2}\right)^2} = \sum'_{v=1}^{\infty} \left(\frac{1}{x - \frac{2v-1}{2}} + \frac{1}{x + \frac{2v-1}{2}}\right), \end{aligned}$$

wobei aber in den an vierter Stelle stehenden Summen die Größen $\frac{1}{x-\nu}$ und $\frac{1}{x+\nu}$ nicht von einander zu trennen sind. Die Differentiation dieser Gleichungen führt auf die Formeln:

$$-\frac{\pi^2}{\sin^2 \pi x} = \sum_{\nu=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(x-\nu)^2}, \quad -\frac{\pi^2}{\cos^2 \pi x} = \sum_{\nu=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\left(x - \frac{2\nu+1}{2}\right)^2}.$$

Setzt man in dem ersten Ausdruck für $\sin \pi x$ an Stelle x ($x-a$), wo a keine ganze Zahl bedeuten soll und dividirt $\sin \pi(x-a)$ durch $\sin(-\pi a)$ so entsteht die Gleichung

$$\frac{\sin \pi(x-a)}{\sin(-\pi a)} = \left(1 - \frac{x}{a}\right) \prod_{\nu} \left(1 - \frac{x}{\nu+a}\right) e^{\frac{x}{\nu}}.$$

Will man rechterhand die Primfunctionen $\left(1 - \frac{x}{\nu+a}\right) e^{\frac{x}{\nu+a}}$ auftreten lassen, so beachte man, daß man

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{x}{a}\right) \prod_{\nu} \left(1 - \frac{x}{\nu+a}\right) e^{\frac{x}{\nu}} \\ &= \left(1 - \frac{x}{a}\right) \prod_{\nu} \left(1 - \frac{x}{\nu+a}\right) \cdot e^{\frac{x}{\nu+a}} \prod_{\nu} e^{x\left(\frac{1}{\nu} - \frac{1}{\nu+a}\right)} \end{aligned}$$

setzen darf, indem das Product

$$\prod_{\nu} e^{x\left(\frac{1}{\nu} - \frac{1}{\nu+a}\right)} = e^{x \sum' \left(\frac{1}{\nu} - \frac{1}{\nu+a}\right)} = e^{x\left(\frac{1}{a} + \pi \cotg(-\pi a)\right)}$$

beständig gleichmäßig convergirt, wie das nach der allgemeinen Theorie nothwendig ist.

Nun entsteht die später zu benutzende Formel

$$\left(1 - \frac{x}{a}\right) \cdot e^{\frac{x}{a}} \prod_{\nu} \left(1 - \frac{x}{\nu+a}\right) \cdot e^{\frac{x}{\nu+a}} = \frac{\sin \pi(x-a)}{\sin(-\pi a)} e^{\pi x \cotg \pi a},$$

der die nachstehende leicht zuzugesellen ist:

$$\prod_{\nu} \left(1 - \frac{x}{\frac{2\nu+1}{2} + a}\right) \cdot e^{\frac{x}{\frac{2\nu+1}{2} + a}} = \frac{\cos \pi(x-a)}{\cos(-\pi a)} e^{\pi x \tg \pi a},$$

wo a aber keine der Zahlen $\frac{2\mu+1}{2}$ ($\mu = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) sein darf.

Zunächst kann man diese Formeln dazu benutzen, um die Functionen

$$\begin{aligned}
\frac{\cos \pi x + \cos \pi a}{1 + \cos \pi a} &= \frac{\cos \pi \left(\frac{x+a}{2}\right) \cos \pi \left(\frac{x-a}{2}\right)}{\cos^2 \pi \frac{a}{2}} \\
\frac{\cos \pi x - \cos \pi a}{1 - \cos \pi a} &= \frac{\sin \pi \left(\frac{x+a}{2}\right) \sin \pi \left(\frac{x-a}{2}\right)}{\sin^2 \pi \frac{a}{2}} \\
\frac{\sin \pi x + \sin \pi a}{\sin \pi a} &= \frac{\sin \pi \left(\frac{x+a}{2}\right) \cos \pi \left(\frac{x-a}{2}\right)}{\sin \pi \frac{a}{2} \cos \pi \frac{a}{2}} \\
\frac{\sin \pi x - \sin \pi a}{\sin \pi a} &= \frac{\cos \pi \left(\frac{x+a}{2}\right) \sin \pi \left(\frac{x-a}{2}\right)}{\cos \pi \frac{a}{2} \sin \pi \frac{a}{2}}
\end{aligned}$$

durch Producte darzustellen, die als Functionen von x beständig convergiren, auf deren Bildung Euler weitläufig eingegangen ist.

Setzt man in den obigen Formeln $x = a + \frac{1}{2}$ respective $x = a$, so erhält man die Gleichungen:

$$\begin{aligned}
-\operatorname{cosec} \pi a &= \prod_{\nu=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{2\nu-1}{2\nu+2a} \right) e^{\frac{2a+1}{2\nu+2a}} \cdot e^{-\frac{\pi}{2}(2a+1) \cotg \pi a} \\
\sec \pi a &= \prod_{\nu=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{2\nu+1}{2\nu+1+2a} \right) e^{\frac{2a}{2\nu+1+2a}} \cdot e^{-\pi a \operatorname{tg} \pi a},
\end{aligned}$$

in denen die rechten Seiten als Functionen von a in der Umgebung der Stelle $a = 0$ höchstens in den Bereichen

$$|a| < 1 \quad |a| < \frac{1}{2}$$

eine Bedeutung haben. (Vergleiche die Producte in § 186 der Introductio in analysin infinitorum von Euler.)

Da unseren allgemeinen Betrachtungen zufolge die Functionen $\sin \pi x$ und $\cos \pi x$ auch durch

$$\pi x e^{-\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{1}{\mu+1} \left(\frac{x}{\nu}\right)^{\mu+1}} \quad \text{beziehungsweise} \quad e^{-\sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{1}{\mu+1} \left(\frac{x}{\nu+1}\right)^{\mu+1}}$$

darzustellen sind (siehe pag. 312) und die Entwicklung dieser Ausdrücke nach Potenzen von x der Form nach andere Coefficienten enthält als die schon bekannten Potenzreihen

$$\sin \pi x = \pi x - \frac{(\pi x)^3}{3!} + \frac{(\pi x)^5}{5!} - \dots$$

$$\cos \pi x = 1 - \frac{(\pi x)^2}{2!} + \frac{(\pi x)^4}{4!} - \dots,$$

so kann man durch Vergleich der beiden Entwicklungen eine Reihe interessanter Ausdrücke für die ganzzahligen Potenzen von π aufstellen. Es wird

$$\begin{aligned} 1 + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{4^2} + \dots &= \frac{\pi^2}{6} = \frac{1}{6} \frac{2\pi^2}{2!} \\ 1 + \frac{1}{2^4} + \frac{1}{3^4} + \frac{1}{4^4} + \dots &= \frac{\pi^4}{90} = \frac{1}{30} \frac{2^3 \pi^4}{4!} \\ 1 + \frac{1}{2^6} + \frac{1}{3^6} + \frac{1}{4^6} + \dots &= \frac{\pi^6}{945} = \frac{1}{42} \frac{2^5 \pi^6}{6!} \\ 1 + \frac{1}{2^8} + \frac{1}{3^8} + \frac{1}{4^8} + \dots &= \frac{\pi^8}{9450} = \frac{1}{30} \frac{2^7 \pi^8}{8!} \\ 1 + \frac{1}{2^{10}} + \frac{1}{3^{10}} + \frac{1}{4^{10}} + \dots &= \frac{\pi^{10}}{93555} = \frac{5}{66} \frac{2^9 \pi^{10}}{10!} \end{aligned}$$

u. s. w. Die numerischen Factoren $\frac{1}{6}, \frac{1}{30}, \frac{1}{42}, \frac{1}{30}, \frac{5}{66}, \dots$ heißen die Bernoulli'schen Zahlen, die wir mit

$$B_1, B_3, B_5, \dots$$

bezeichnen.

Der Vergleich der beiden Reihen für $\cos \pi x$ gibt uns Ausdrücke für die Summen

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{(2\nu-1)^{2\mu}} \quad (\mu = 1, 2, 3, \dots),$$

die sich aber bereits aus der Summe der $(-2\mu)^{\text{ten}}$ Potenzen aller ganzen Zahlen in folgender Weise bestimmen lassen: Nennt man die Summe

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu^{2\mu}} = S_{2\mu},$$

so ist

$$\frac{S_{2\mu}}{2^{2\mu}} = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{(2\nu)^{2\mu}} \text{ und } S_{2\mu} - \frac{S_{2\mu}}{2^{2\mu}} = \frac{2^{2\mu}-1}{2^{2\mu}} S_{2\mu} = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{(2\nu-1)^{2\mu}}$$

oder

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{(2\nu-1)^{2\mu}} = B_{2\mu-1} \frac{2^{2\mu}-1}{2^{2\mu-1}} \frac{\pi^{2\mu}}{(2\mu)!}$$

und ferner ist auch

$$S_{2\mu} - \frac{2S_{2\mu}}{2^{2\mu}} = \frac{2^{2\mu}-1}{2^{2\mu}-1} S_{2\mu} = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\nu-1}}{\nu^{2\mu}} = B_{2\mu-1} \frac{2^{2\mu}-1}{(2\mu)!} \pi^{2\mu}.$$

Mit Hilfe der Formeln:

$$\cotg x = \frac{1}{x} + \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{2x}{(x^2 - \nu^2 \pi^2)}, \quad \tg x = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{2x}{\left(\left(\frac{2\nu-1}{2}\right)^2 \pi^2 - x^2\right)}$$

kann man $\cotg x$ und $\tg x$ in der Umgebung der Stelle $x = 0$ durch Potenzreihen nach x darstellen, indem man die einzelnen der Summanden nach Potenzen von x entwickelt. Es wird dann:

$$\begin{aligned}\cotg x &= \frac{1}{x} - \frac{2x}{\pi^2} \sum_{\mu=0}^{\infty} \left(\frac{x^{2\mu}}{\pi^{2\mu}} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu^{2\mu+2}} \right) \\ &= \frac{1}{x} - \left(B_1 \frac{2^2 x}{2!} + B_3 \frac{2^4 x^3}{4!} + B_5 \frac{2^6 x^5}{6!} + \dots \right) \\ \tg x &= \frac{2^2 x}{\pi^2} \sum_{\mu=0}^{\infty} \left(\left(\frac{2x}{\pi} \right)^{2\mu} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{(2\nu-1)^{2\mu+2}} \right) \\ &= B_1 2^2 (2^2 - 1) \frac{x}{2!} + B_3 2^4 (2^4 - 1) \frac{x^3}{4!} + B_5 2^6 (2^6 - 1) \frac{x^5}{6!} + \dots\end{aligned}$$

Da die Coefficienten der Potenzreihe für $\tg x$:

$$\sum_{\mu=1}^{\infty} c_{2\mu-1} \frac{x^{2\mu-1}}{(2\mu-1)!}$$

der Recursionsformel genügen:

$$\begin{aligned}c_{2n-1} - \binom{2n-1}{2} c_{2n-3} + \binom{2n-1}{4} c_{2n-5} - \dots \\ + (-1)^{n-1} \binom{2n-1}{2n-2} c_1 = (-1)^{n-1},\end{aligned}$$

wird man die Bernoulli'schen Zahlen nach und nach aus den Gleichungen

$$\begin{aligned}\frac{2^{2n}(2^{2n}-1)}{2^n} B_{2n-1} - \binom{2n-1}{2} \frac{2^{2n-2}(2^{2n-2}-1)}{2^{n-2}} B_{2n-3} + \dots \\ + (-1)^{n-2} \binom{2n-1}{2n-4} \frac{2^4(2^4-1)}{4} B_3 + (-1)^{n-1} \binom{2n-1}{2n-2} \frac{2^2(2^2-1)}{2} B_1 = (-1)^{n-1} \\ (n = 2, 3, \dots)\end{aligned}$$

bestimmen können.

Beachtet man, daß

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \left(\cotg \frac{x}{2} + \tg \frac{x}{2} \right) &= \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \frac{x}{2}}{\sin \frac{x}{2}} + \frac{\sin \frac{x}{2}}{\cos \frac{x}{2}} \right) = \frac{1}{2 \sin \frac{x}{2} \cos \frac{x}{2}} = \frac{1}{\sin x} = \operatorname{cosec} x, \\ \cotg \pi x + \tg \pi \frac{x}{2} &= \operatorname{cosec} \pi x\end{aligned}$$

ist, so ergibt sich für die Function Cosecante erstens die Reihenentwicklung

$$\operatorname{cosec} x = \frac{1}{x} + \sum_{n=1}^{\infty} B_{2n-1} \frac{2^{2n-1}-1}{n} \frac{x^{2n-1}}{(2n-1)!}$$

und durch Addition der Gleichungen:

$$\pi \cotg \pi x = \frac{1}{x} + \sum_{v=-\infty}^{+\infty} \frac{x}{v(x-v)}$$

$$\pi \operatorname{tg} \pi \frac{x}{2} = \sum_{v=-\infty}^{+\infty} \frac{2x}{(2v+1)(2v+1-x)}$$

die Darstellung:

$$\pi \operatorname{cosec} \pi x = \frac{1}{x} + \sum_{v=-\infty}^{+\infty} \frac{(-1)^v x}{v(x-v)} = \frac{1}{x} + \sum_{v=-\infty}^{+\infty} (-1)^v \left(\frac{1}{x-v} + \frac{1}{v} \right)$$

$$= \frac{1}{x} + \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(-1)^v 2x}{x^2 - v^2} = \frac{1}{x} + \sum_{v=1}^{\infty} (-1)^v \left(\frac{1}{x-v} + \frac{1}{x+v} \right).$$

Um den Cyclus der Darstellungen der trigonometrischen Functionen durch Potenzreihen, unendliche Producte oder unendliche Summen rationaler Functionen voll zu machen, hat man noch $\pi \sec \pi x$ durch eine Summe und $\sec x$ in der Umgebung der Stelle $x=0$ durch eine convergente Potenzreihe $\sum_{v=0}^{\infty} c_v \frac{x^v}{v!}$ darzustellen. Wir werden diese Aufgabe alsbald lösen und bemerken hier nur, daß $c_0 = 1$ und alle Coefficienten $c_{2\mu-1}$ Null sein müssen, weil

$$\sec 0 = 1 \quad \text{und} \quad \left(\frac{d^{2\mu-1} \sec x}{dx^{2\mu-1}} \right)_{x=0} = 0$$

ist. —

Um eine andere Anwendung der früheren Sätze über die ganzen Functionen mit gegebenen Nullstellen vorzubringen, wollen wir den *Sinus und Cosinus ganzzahliger Vielfache des Argumentes x als Product einer endlichen Anzahl von Sinus und Cosinus-Functionen neuer Argumente* darstellen.

Da die Function $\sin mx$ offenbar dieselben Nullstellen besitzt wie all die Functionen

$$\sin x, \sin \left(\frac{\pi}{m} - x \right), \sin \left(\frac{2\pi}{m} - x \right), \dots, \sin \left(\frac{(m-1)\pi}{m} - x \right)$$

oder

$$\sin x, \sin \left(x + \frac{\pi}{m} \right), \sin \left(x + \frac{2\pi}{m} \right), \dots, \sin \left(x + \frac{(m-1)\pi}{m} \right)$$

und keine weiteren, so kann man

$$\sin mx = \varrho(x) \sin x \prod_{k=1}^{m-1} \sin \left(x + \frac{k\pi}{m} \right) = \varrho(x) \sin x \prod_{k=1}^{m-1} \sin \left(\frac{k\pi}{m} - x \right)$$

setzen, und der Vergleich der beiden Seiten dieser Gleichung zugehörigen Darstellungen durch ein Product von Primfunctionen lehrt, wie die ganze Function $g(x)$ beschaffen sein muß.

Ist m eine ungerade Zahl $2\mu + 1$, so schreibe man statt der Factoren $\sin\left(x + \frac{k\pi}{m}\right)$ ($k = \mu + 1, \mu + 2, \dots, 2\mu$) $\sin\left(\frac{(m-k)\pi}{m} - x\right)$ und wenn $m = 2\mu$ ist, setze man an Stelle von $\sin\left(x + \frac{\mu\pi}{m}\right)$ $\sin\left(\frac{\pi}{2} - x\right) = \cos x$ und für

$$\sin\left(x + \frac{(\mu + \nu)\pi}{m}\right) = \sin\left(\frac{\mu - \nu}{m}\pi - x\right) \quad (\nu = 1, 2, \dots, \mu - 1),$$

dann geht die obige Gleichung in die folgenden über:

$$\sin mx = \sin(2\mu + 1)x = \varphi_1(x) \sin x \prod_{\lambda=1}^{\mu} \sin\left(\frac{\pi\lambda}{m} - x\right) \sin\left(\frac{\pi\lambda}{m} + x\right),$$

$$\sin mx = \sin 2\mu x = \varphi_2(x) \sin x \cos x \prod_{\lambda=1}^{\mu-1} \sin\left(\frac{\pi\lambda}{m} - x\right) \sin\left(\frac{\pi\lambda}{m} + x\right).$$

Wenn man ferner die leicht zu verificirende Beziehung:

$$\sin(u + v) \cdot \sin(u - v) = \sin^2 u - \sin^2 v$$

verwendet, erhält man die nachstehenden Darstellungen:

$$\sin mx = \sin(2\mu + 1)x = \varphi_1(x) \cdot \sin x \prod_{\lambda=1}^{\mu} \left(\sin^2 \frac{\pi\lambda}{m} - \sin^2 x\right)$$

$$\sin mx = \sin 2\mu x = \varphi_2(x) \sin x \cos x \prod_{\lambda=1}^{\mu-1} \left(\sin^2 \frac{\pi\lambda}{m} - \sin^2 x\right),$$

aus denen mit Hilfe der Reihenentwicklung für $\sin mx$ und $\sin x$ abzulesen ist, daß $\varphi_1(x)$ und $\varphi_2(x)$ nur Constante C_1 und C_2

$$C_1 = \frac{2\mu + 1}{\prod_{\lambda=1}^{\mu} \sin^2 \frac{\pi\lambda}{2\mu + 1}}, \quad C_2 = \frac{2\mu}{\prod_{\lambda=1}^{\mu-1} \sin^2 \frac{\pi\lambda}{2\mu}}$$

sein können.

Ebenso findet man die Gleichungen:

$$\cos mx = \cos(2\mu + 1)x = C \cos x \prod_{\lambda=1}^{\mu} \sin\left(\frac{\pi 2\lambda - 1}{2} \frac{1}{m} - x\right) \sin\left(\frac{\pi 2\lambda - 1}{2} \frac{1}{m} + x\right)$$

$$= C \cos x \prod_{\lambda=1}^{\mu} \left(\sin^2 \frac{\pi 2\lambda - 1}{2} \frac{1}{m} - \sin^2 x\right)$$

$$\cos mx = \cos 2\mu x = C \prod_{\lambda=1}^{\mu} \sin\left(\frac{\pi 2\lambda - 1}{2} \frac{1}{m} - x\right) \sin\left(\frac{\pi 2\lambda - 1}{2} \frac{1}{m} + x\right)$$

$$= C \prod_{\lambda=1}^{\mu} \left(\sin^2 \frac{\pi 2\lambda - 1}{2} \frac{1}{m} - \sin^2 x\right)$$

und die Constante C ist das Reciproke des Productes $\prod_{\lambda=1}^{\mu} \sin \frac{2\pi}{2} \cdot \frac{2\lambda - 1}{m}$.

Da

$2(\sin^2 u - \sin^2 v) = (\cos^2 v - \sin^2 v) - (\cos^2 u - \sin^2 u) = \cos 2v - \cos 2u$
ist, bestehen auch die folgenden Formeln:

$$\sin mx = \sin(2\mu+1)x = \frac{2\mu+1}{2^\mu} \frac{1}{\prod_{\lambda=1}^{\mu} \sin^2 \frac{\pi \lambda}{m}} \cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) \prod_{\lambda=1}^{\mu} \left(\cos 2x - \cos \frac{2\pi \lambda}{m}\right)$$

$$\sin mx = \sin 2\mu x = \frac{2\mu}{2^{\mu-1}} \frac{1}{\prod_{\lambda=1}^{\mu-1} \sin^2 \frac{\pi \lambda}{m}} \cos x \cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) \prod_{\lambda=1}^{\mu-1} \left(\cos 2x - \cos \frac{2\pi \lambda}{m}\right)$$

$$\cos mx = \cos(2\mu+1)x = -\frac{1}{2^\mu \prod_{\lambda=1}^{\mu} \sin^2 \frac{\pi 2\lambda-1}{2m}} \cos x \prod_{\lambda=1}^{\mu} \left(\cos 2x - \cos \frac{2\pi \lambda-1}{m}\right)$$

$$\cos mx = \cos 2\mu x = -\frac{1}{2^{\mu-1} \prod_{\lambda=1}^{\mu-1} \sin^2 \frac{\pi 2\lambda-1}{2m}} \prod_{\lambda=1}^{\mu-1} \left(\cos 2x - \cos \frac{2\pi \lambda-1}{m}\right).$$

Vergleicht man die obigen Formeln mit den auf Seite 298 angeschriebenen Darstellungen von $\sin mx$ und $\cos mx$ als rationale Functionen von $\sin x$ und $\cos x$, so erhält man durch Gleichsetzen der Coefficienten der höchsten Potenzen von $\sin x$ die Beziehungen:

$$(-1)^\mu C_1 = \frac{(-1)^\mu (2\mu+1)}{\prod_{\lambda=1}^{\mu} \sin^2 \frac{\pi \lambda}{2\mu+1}} = (-1)^\mu \frac{m(m^2-1^2) \dots (m^2-(\mu-2)^2)}{m!} = (-1)^\mu 2^{m-1}$$

oder

$$2^{2\mu} \prod_{\lambda=1}^{\mu} \sin^2 \frac{\pi \lambda}{2\mu+1} = 2\mu+1, \quad C_1 = 2^{m-1},$$

und ebenso

$$2^{2\mu-1} \prod_{\lambda=1}^{\mu-1} \sin^2 \frac{\pi \lambda}{2\mu} = 2\mu, \quad C_2 = 2^{m-1},$$

$$2^{2\mu} \prod_{\lambda=1}^{\mu} \sin^2 \frac{\pi 2\lambda-1}{2(2\mu+1)} = 1, \quad 2^{2\mu-1} \prod_{\lambda=1}^{\mu-1} \sin^2 \frac{\pi 2\lambda-1}{2 \cdot 2\mu} = 1, \quad C = 2^{m-1}.$$

Setzt man $\sin x = u$ und $m = 2\mu+1$, so besteht die Gleichung:

$$1 - \frac{m}{1!} \frac{u}{\sin mx} + \frac{m(m^2-1^2)}{3!} \frac{u^3}{\sin mx} - \dots + (-1)^{\frac{m+1}{2}} 2^{m-1} \frac{u^m}{\sin mx} = 0,$$

deren m Wurzeln u wir angeben wollen. Das Product derselben ist

$$\frac{(-1)^\mu}{2^{m-1}} \sin mx \text{ oder } (-1)^\mu \sin x \prod_{\lambda=1}^{\mu} \sin\left(\frac{\pi\lambda}{m} - x\right) \sin\left(\frac{\pi\lambda}{m} + x\right)$$

und weil — wie man sich leicht überzeugt —

$$\sin x \prod_{\lambda=1}^{\mu} \sin\left(\frac{\pi\lambda}{m} - x\right) \sin\left(\frac{\pi\lambda}{m} + x\right) = (-1)^\mu \prod_{k=0}^{m-1} \sin\left(x + \frac{2k\pi}{m}\right)$$

ist, heißen die m Wurzeln:

$$\sin x, \sin\left(x + \frac{2\pi}{m}\right), \sin\left(x + \frac{4\pi}{m}\right), \dots, \sin\left(x + \frac{2(m-1)\pi}{m}\right)$$

oder

$$\sin x, \pm \sin\left(\frac{\lambda\pi}{m} + x\right), \mp \sin\left(\frac{\lambda\pi}{m} - x\right) (\lambda = 1, 2, \dots, \mu),$$

und zwar gelten hier die oberen oder unteren Zeichen, je nachdem λ gerade oder ungerade ist.

Da unsere Gleichung das Glied in u^{m-1} nicht enthält, ist

$$\sum_{k=0}^{m-1} \sin\left(x + \frac{2k\pi}{m}\right) = 0$$

und der Coefficient von $-u \frac{m}{\sin mx}$ muß gleich

$$\sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{\sin\left(x + \frac{2k\pi}{m}\right)}$$

sein.

Bei geradem $m = 2\mu$ besteht die Gleichung:

$$\sin^2 mx - u^2(1 - u^2) \left(\frac{n}{1} - \frac{n(n^2 - 2^2)}{3!} u^2 + \dots + (-1)^{\mu-1} 2^{2\mu-1} u^{2\mu-2} \right)^2 = 0.$$

Das Product ihrer Wurzeln ist

$$\frac{\sin^2 mx}{2^{2\mu-2}} = \sin^2 x \sin^2\left(\frac{\pi}{2} - x\right) \prod_{\lambda=1}^{\mu-1} \sin^2\left(\frac{\pi\lambda}{m} - x\right) \sin^2\left(\frac{\pi\lambda}{m} + x\right)$$

und die positiv und negativ genommenen Factoren der rechten Seite sind die Wurzeln selbst. Die positiven allein genügen der Gleichung:

$$\sin mx = + \sqrt{1 - u^2} \left(\frac{n}{1} u - \frac{n(n^2 - 2^2)}{3!} u^2 + \dots + (-1)^{\mu-1} 2^{2\mu-1} u^{2\mu-2} \right).$$

In entsprechender Weise hat man vorzugehen, um die Wurzeln der Gleichungen

$$\cos mx = \cos(2\mu+1)x = + \sqrt{1 - u^2} \left(1 - \frac{n^2 - 1^2}{2!} u^2 + \dots + (-1)^\mu 2^{2\mu-1} u^{2\mu-1} \right)$$

$$\cos mx = \cos 2\mu x = 1 - \frac{n^2}{2!} u^2 + \frac{n^2(n^2 - 2^2)}{4!} u^4 - \dots + (-1)^\mu 2^{2\mu-1} u^{2\mu}$$

zu finden.

§ 52. Die Weierstrass'sche σ -Function.

Wir wollen noch eine ganze Function $G_0(x)$ herstellen, welche die unendlich vielen Nullstellen

$$w = 2\mu\omega + 2\mu'\omega' \quad (\mu, \mu' = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm \infty)$$

besitzt, wo ω und ω' solche Größen sein müssen, daß in einem endlichen Bereich der Variablen x nicht unendlich viele Nullstellen w liegen, denn andernfalls gäbe es keine ganze Function der verlangten Art.*)

Es kann zunächst keine der Größen ω und ω' unendlich klein sein; sie können aber auch nicht in reellem Verhältnis stehen, denn wäre in

$$w = 2\omega \left(\mu + \mu' \frac{\omega'}{\omega} \right)$$

die Klammergröße reell und zunächst $\frac{\omega'}{\omega}$ eine rationale Zahlengröße, so könnte man unendlich viele ganze Zahlen μ und μ' angeben, für die $\mu + \mu' \frac{\omega'}{\omega}$ gleich Eins würde und dann wäre die Nullstelle $x = 2\omega$ von unendlich hoher Ordnung, was nicht zulässig ist. Wäre aber $\frac{\omega'}{\omega}$ eine irrationale Zahlengröße, so ließen sich stets ganze Zahlen μ_v und μ'_v finden, für die

$$|2\mu_v\omega - 2\mu'_v\omega'|$$

kleiner würde als eine beliebig kleine positive Größe δ und dann wäre $x = 0$ eine Häufungsstelle von Nullstellen. In der That: entwickelt man das reelle Verhältnis $\frac{\omega'}{\omega}$ in einen unendlichen Kettenbruch, ein endlicher kann sich nicht ergeben, weil sonst $\frac{\omega'}{\omega}$ rational wäre, und bildet die Differenz von $\frac{2\omega'}{2\omega}$ und dem v^{ten} Näherungsbruche $\frac{\mu_v}{\mu'_v}$, so wird deren absoluter Betrag kleiner als $\left(\frac{1}{\mu'_v}\right)^2$ und

$$2\mu_v\omega - 2\mu'_v\omega' = \pm \frac{2\omega\varepsilon}{\mu'_v},$$

wo ε positiv und kleiner als 1 ist. Weil aber Zähler und Nenner der Näherungsbrüche eines Kettenbruches fortwährend zunehmen, so kann man auch ein v so angeben, daß $\left|\frac{2\omega\varepsilon}{\mu'_v}\right| < \delta$ wird, w. z. b. w.

*) Vergleiche Weierstrass, Formeln und Lehrsätze zum Gebrauche der elliptischen Functionen (herausgegeben von H. A. Schwarz) und andererseits Kiepert, ganzzahlige Multiplication der elliptischen Functionen (Borchardt's Journal, Bd. 76).

Soll demnach eine ganze Function existiren, welche die Nullstellen w besitzt, so muß das Verhältniß

$$\frac{\omega'}{\omega} = \tau$$

complex oder der reelle Theil von $\frac{\omega'}{i\omega} \Re\left(\frac{\omega'}{i\omega}\right)$ von Null verschieden sein, aber dann gibt es in einem endlichen Bereiche nur eine endliche Anzahl von Stellen $2\mu\omega + 2\mu'\omega'$.

Zum Beweise beachte man, daß sich bei nicht reellem Verhältniß der Größen $2\omega = \alpha + i\beta$ und $2\omega' = \alpha' + i\beta'$, wo $(\alpha\beta' - \alpha'\beta)$ von Null verschieden ist, jede GröÙe $2a = a_1 + ia_2$ in der Form $2\xi_1\omega + 2\xi_2\omega'$ darstellen läßt, wobei ξ_1 und ξ_2 reelle GröÙen bleiben. Man hat ξ_1 und ξ_2 nur aus den zwei Gleichungen $a_1 = \alpha\xi_1 + \alpha'\xi_2$ und $a_2 = \beta\xi_1 + \beta'\xi_2$ zu entnehmen. Darauf läßt sich jeder endliche Bereich durch die Gesamtheit der Stellen $2\xi_1\omega + 2\xi_2\omega'$ definiren, für welche ξ_1 und ξ_2 zwischen endlichen Grenzen gelegen sind, und man sieht, daß ξ_1 und ξ_2 innerhalb des Bereiches nur eine endliche Anzahl Male ganze Zahlen sein können.

Man nennt zwei Größenpaare $(2\omega, 2\omega')$ und $(2\varpi, 2\varpi')$ von nicht reellem Verhältniß *äquivalent*, wenn die Gesamtheit der Werthe

$$w = 2\mu\omega + 2\mu'\omega'$$

mit der Gesamtheit der Werthe

$$w = 2\nu\varpi + 2\nu'\varpi' \quad (\nu, \nu' = 0, \pm 1, \pm 2 \dots)$$

übereinstimmt. Man sieht, daß die nothwendige und hinreichende Bedingung für die Äquivalenz zweier Größenpaare in der Existenz zweier Gleichungen liegt:

$$\varpi = p\omega + q\omega', \quad \varpi' = p'\omega + q'\omega',$$

in welchen die positiven oder negativen ganzen Zahlen wieder der Bedingung

$$pq' - p'q = \pm 1$$

genügen, denn unter diesen Umständen kann man stets zwei ganze Zahlen ν und ν' so bestimmen, daß

$$2\mu\omega + 2\mu'\omega' = 2\nu\varpi + 2\nu'\varpi' = 2(\nu p + \nu' p')\omega + 2(\nu q + \nu' q')\omega'$$

wird, und umgekehrt müssen die obigen Bedingungen erfüllt sein, wenn jeder Stelle w eine Stelle ϖ und umgekehrt entspricht.

Wir können jetzt festsetzen, daß $\Re\left(\frac{\omega'}{\omega i}\right) > 0$ sei, denn andernfalls wähle man nur ein $(2\omega, 2\omega')$ äquivalentes Größenpaar $(2\varpi, 2\varpi')$, für welches

$$\Re\left(\frac{\varpi'}{\varpi i}\right) = \Re\left(\frac{p'\omega + q'\omega'}{p\omega + q\omega'} \cdot \frac{1}{i}\right)$$

größer als Null ist und dazu muß nur $pq' - q'p = -1$ sein.

Jetzt handelt es sich noch darum, in den Primfunctionen

$$E\left(\frac{x}{w}, m_{\mu, \mu'}\right)$$

die ganzen Zahlen $m_{\mu, \mu'}$ passend zu wählen, denn wenn wir auch schon wissen, daß das Product

$$x \prod' \left(1 - \frac{x}{w_v}\right) e^{\sum_{\mu=1}^{v-1} \frac{1}{\mu} \left(\frac{x}{w_v}\right)^\mu}$$

eine ganze Function der verlangten Art definirt, sofern die Nullstellen

$$w_1, w_2, \dots, w_r, \dots$$

der Bedingung

$$|w_v| \leq |w_{v+1}|$$

gemäß geordnet sind, so braucht dies durchaus nicht die einfachste Function zu sein. Wir sehen darum nach, ob es etwa eine ganze Zahl m derart gibt, daß

$$\sum_{\mu, \mu'} \left| \frac{1}{2\mu\omega + 2\mu'\omega'} \right|^{m+1}$$

endlich wird, denn dann existirt eine ganze Function m^{ten} Ranges, welche die Nullstellen w besitzt.

Bemerkt man, daß man $2n + 1$ Größen $w = 2\mu\omega + 2\mu'\omega'$ angeben kann, bei denen μ oder μ' gleich $\pm n$ ist, so finden sich im Ganzen

$$4(2n + 1) - 4 = 8n$$

Nullstellen, bei denen eine der Größen μ, μ' den Werth $+n$ oder $-n$ besitzt. Stellt man alle diese Größen w in der Form $n\delta_n$ dar, so kann $|\delta_n|$ niemals kleiner werden als eine endliche Größe $|\delta_0|$ und man sieht, daß in der Ungleichung:

$$\sum_{\mu, \mu'} \left| \frac{1}{w} \right|^{m+1} < \frac{8}{|\delta_0|^{m+1}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{n^{m+1}} = \frac{8}{|\delta_0|^{m+1}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^m}$$

die rechte Seite schon für $m = 2$ endlich ist und umsomehr

$$\sum_{\mu, \mu'} \left| \frac{1}{w^3} \right|$$

convergiert.

Deshalb wird bereits das Product

$$x \prod'_{(\mu, \mu')} \left(1 - \frac{x}{w}\right) e^{\frac{x}{w} + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{w}\right)^2}$$

beständig convergiren. Diese ganze Function bezeichnen wir mit $\sigma(x)$.

Die logarithmische Ableitung derselben:

$$\frac{\sigma'(x)}{\sigma(x)} = \frac{1}{x} + \sum_{\mu, \mu'} \left(\frac{1}{x-w} + \frac{1}{w} + \frac{x}{w^2} \right) = \frac{1}{x} + \sum_{\mu, \mu'} \frac{x^2}{w^2(x-w)},$$

ferner

$$-\frac{d^2 \log \sigma(x)}{dx^2} = \frac{1}{x^2} + \sum'_{\mu, \mu'} \left(\frac{1}{(x-w)^2} - \frac{1}{w^2} \right)$$

und

$$-\frac{d^3 \log \sigma(x)}{dx^3} = -2 \sum'_{\mu, \mu'} \frac{1}{(x-w)^3}$$

stellen analytische Functionen dar, die im Endlichen die ein-, zwei- oder dreifachen außerwesentlich singulären Stellen $x = w$ besitzen, deren Häufungsstelle $x = \infty$ ist.

Die dritte der genannten Functionen bleibt ungeändert, wenn man x um irgend eine der aus 2ω und $2\omega'$ durch Addition oder Subtraction zusammengesetzten Größen w vermehrt. Da aber zufolge des nicht reellen Verhältnisses $\frac{\omega'}{\omega}$ keine homogene ganzzahlige lineare Relation zwischen 2ω und $2\omega'$ besteht, ist die Function $-\frac{d^3 \log \sigma(x)}{dx^3}$ *doppeltperiodisch*.

Bezeichnet man

$$-\frac{d^2 \log \sigma(x)}{dx^2} = p(x),$$

so ist

$$p'(x + 2\omega) = p'(x + 2\omega') = p'(x + w) = p'(x).$$

Weil aber

$$\sigma(-x) = -\sigma(x), \quad \sigma'(-x) = \sigma'(x), \quad \frac{\sigma'(-x)}{\sigma(-x)} = -\frac{\sigma'(x)}{\sigma(x)},$$

ist, wird

$$p(-x) = p(x) \quad \text{und} \quad p'(-x) = -p'(x)$$

und

$$p'(\omega) = 0, \quad p'(\omega') = 0, \quad p'(\omega + \omega') = 0$$

$$p(\omega) = p(-\omega), \quad p(\omega') = p(-\omega').$$

Nach dieser Zusammenstellung der Werthe von $p(x)$ und $p'(x)$ an zwei Stellen entnehmen wir den Gleichungen:

$$\frac{dp(x + 2\omega)}{dx} = \frac{dp(x)}{dx}, \quad \frac{dp(x + 2\omega')}{dx} = \frac{dp(x)}{dx}$$

die Beziehungen

$$p(x + 2\omega) = p(x), \quad p(x + 2\omega') = p(x)$$

d. h. auch $p(x)$ hat die beiden Perioden 2ω und $2\omega'$ und die aus diesen ganzzahlig zusammengesetzten Perioden w .

Die doppeltperiodische Function $p(x)$ wird an jeder Nullstelle der Function $\sigma(x)$ so unendlich, daß erst

$$(x - w)^2 p(x)$$

in der Umgebung derselben regulären Verhaltens ist und wird an allen übrigen Stellen regulär; sie muß daher als Quotient zweier ganzen Functionen darstellbar sein.

Die Function $\frac{\sigma'(x)}{\sigma(x)}$ ist nicht mehr doppelperiodisch, es entstehen vielmehr durch Integration der letzten Gleichungen die Beziehungen

$$\frac{\sigma'(x+2\omega)}{\sigma(x+2\omega)} = \frac{\sigma'(x)}{\sigma(x)} + 2\eta$$

$$\frac{\sigma'(x+2\omega')}{\sigma(x+2\omega')} = \frac{\sigma'(x)}{\sigma(x)} + 2\eta'$$

und hier sind die Constanten 2η und $2\eta'$ so zu bestimmen, daß für $x = -\omega$ die richtigen Gleichungen

$$\frac{\sigma'(-\omega)}{\sigma(-\omega)} = -\frac{\sigma'(\omega)}{\sigma(\omega)}, \quad \frac{\sigma'(-\omega')}{\sigma(-\omega')} = -\frac{\sigma'(\omega')}{\sigma(\omega')}$$

hervorgehen. Man erhält

$$\eta = \frac{\sigma'(\omega)}{\sigma(\omega)}, \quad \eta' = \frac{\sigma'(\omega')}{\sigma(\omega')}.$$

Eine abermalige Integration führt unter Rücksicht auf die Gleichungen

$$\sigma(-\omega) = -\sigma(\omega), \quad \sigma(-\omega') = -\sigma(\omega')$$

zu den Relationen

$$\sigma(x+2\omega) = -e^{2\eta(x+\omega)}\sigma(x), \quad \sigma(x+2\omega') = -e^{2\eta'(x+\omega')}\sigma(x).$$

Bildet man aus jeder dieser Gleichungen $\sigma(x+2\omega+2\omega')$, so müssen nothwendig die Exponenten in den Factoren bei $\sigma(x)$

$$2\eta(x+\omega+2\omega') + 2\eta'(x+\omega')$$

und

$$2\eta'(x+\omega'+2\omega) + 2\eta(x+\omega)$$

bis auf ein ganzzahliges Vielfaches von $2\pi i$ gleich sein. Es wird also

$$(2\eta+2\eta')x + 2\eta\omega + 2\eta'\omega' + 4\eta\omega' - ((2\eta'+2\eta)x + 2\eta\omega + 2\eta'\omega' + 4\eta'\omega)$$

$$= \pm 2m\pi i$$

oder

$$\eta\omega' - \eta'\omega = \pm \frac{m}{2}\pi i.$$

Ferner folgt aber bei der Änderung des Argumentes x um eine beliebige Periode ω der Function $p(x)$ die Gleichung:

$$\sigma(x+2\mu\omega+2\mu'\omega') = \sigma(x+2\omega) = (-1)^{\mu\mu'+\mu+\mu'} e^{2(\mu\eta+\mu'\eta')(x+\omega)}\sigma(x),$$

wo wir fernerhin für $\mu\eta + \mu'\eta' = \tilde{\eta}$ schreiben.

Es ist dann

$$\frac{\sigma'(x+2\omega)}{\sigma(x+2\omega)} = \frac{\sigma'(x)}{\sigma(x)} + 2\tilde{\eta}, \quad \tilde{\eta} = \frac{\sigma'(\omega)}{\sigma(\omega)}$$

und wenn man $\omega+\omega' = \omega''$, $\eta+\eta' = \eta''$ setzt, speciell $\eta'' = \frac{\sigma'(\omega'')}{\sigma(\omega'')}$.

An dieser Stelle soll noch die Function $\sigma(x)$ durch ein einfach unendliches Product dargestellt werden, in dem also nur ein Index unendlich viele Werthe annehmen kann.

Man bemerkt leicht, daß die Nullstellen von $\sigma(x)$ mit den Nullstellen der unendlich vielen Functionen

$\sin \frac{\pi}{2\omega} x$, $\sin \frac{\pi}{2\omega} (2n\omega' - x)$, $\sin \frac{\pi}{2\omega} (2n\omega' + x)$ ($n = 1, 2, \dots \infty$) zusammenfallen, und es fragt sich, ob man $\sigma(x)$ als Product dieser Functionen darstellen kann.

In dem Producte für $\sigma(x)$ darf man alle Factoren zusammennehmen, in denen $\mu' = 0$ ist, denn das Product

$$x \prod_{\mu=-\infty}^{+\infty} \left(1 - \frac{x}{2\mu\omega}\right) e^{\frac{x}{2\mu\omega} + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{2\mu\omega}\right)^2}$$

ist gleichmäßig convergent, da ja

$$\prod_{\mu=-\infty}^{+\infty} e^{\frac{1}{2} \left(\frac{x}{2\mu\omega}\right)^2} = e^{\left(\frac{x}{2\omega}\right)^2 \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{1}{\mu^2}} = e^{\frac{\pi^2}{6} \left(\frac{x}{2\omega}\right)^2}$$

und

$$x \prod_{\mu=-\infty}^{+\infty} \left(1 - \frac{x}{2\mu\omega}\right) e^{\frac{x}{2\mu\omega}} = \frac{2\omega}{\pi} \sin \frac{\pi x}{2\omega}$$

ist. Faßt man dann alle Factoren zusammen, welche dasselbe μ' haben, so kann man deren Product gleich

$$\left\{ \prod_{\mu=-\infty}^{+\infty} \left(1 - \frac{x}{2\mu\omega + 2\mu'\omega'}\right) e^{\frac{x}{2\mu\omega + 2\mu'\omega'}} \right\} e^{\frac{1}{2} \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{x}{2\mu\omega + 2\mu'\omega'}\right)^2}$$

setzen, denn die hier vorkommende Summe oder

$$\frac{1}{2} \left(\frac{x}{2\omega}\right)^2 \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{\mu + \mu' \frac{\omega'}{\omega}}\right)^2$$

ist nach der Formel

$$\frac{\pi^2}{\sin^2 \pi x} = \sum_{v=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(v - x)^2}$$

gleich

$$\frac{\pi^2}{2} \left(\frac{x}{2\omega}\right)^2 \frac{1}{\sin^2 \left(\pi \frac{\mu'\omega'}{\omega}\right)}.$$

Wenn μ' somit alle Werthe durchläuft, tritt gewifs der Factor

$$\frac{2\omega}{\pi} \sin \left(\frac{\pi x}{2\omega}\right) e^{\left(\frac{\pi^2}{2\omega}\right) \left\{ \frac{1}{6} + \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{1}{\sin^2 \left(\pi \frac{\mu'\omega'}{\omega}\right)} \right\} \frac{x^2}{2\omega}} = \frac{2\omega}{\pi} \sin \frac{\pi x}{2\omega} e^{\frac{\eta x^2}{2\omega}}$$

auf und es bleiben nur mehr die Producte

$$\prod_{\mu=-\infty}^{+\infty} \left(1 - \frac{1}{2\mu\omega + 2\mu'\omega'}\right) e^{\frac{x}{2\mu\omega + 2\mu'\omega'}} \quad (\mu' = \pm 1, \pm 2, \dots \pm \infty)$$

zu untersuchen. Schreibt man sie in der Form

$$e^{\frac{x}{2\omega}} \left(1 - \frac{x}{\frac{\mu'\omega'}{\omega}}\right) \prod_{\mu=-\infty}^{+\infty} \left(1 - \frac{x}{\mu + \frac{\mu'\omega'}{\omega}}\right) e^{\frac{x}{2\omega} + \mu' \frac{\omega'}{\omega}},$$

so hat man auch schon gefunden, daß dieselben gleich

$$\frac{\sin \pi \left(\mu' \frac{\omega'}{\omega} - \frac{x}{2\omega} \right)}{\sin \pi \mu' \frac{\omega'}{\omega}} e^{\frac{\pi x}{2\omega} \cotg \mu' \frac{\omega'}{\omega}}$$

zu setzen sind. Das Product aller Factoren von $\sigma(x)$ kann man daher in der Form des einfach unendlichen Productes schreiben:

$$\begin{aligned} \sigma(x) &= \frac{2\omega}{\pi} \sin\left(\frac{\pi x}{2\omega}\right) e^{\frac{\eta x^2}{2\omega}} \prod_{\mu=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi}{2\omega} (2\mu'\omega' - x) \sin \frac{\pi}{2\omega} (2\mu'\omega' + x)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{2\omega} 2\mu'\omega'\right)} \\ &= \frac{2\omega}{\pi} \sin\left(\frac{\pi x}{2\omega}\right) e^{\frac{\eta x^2}{2\omega}} \prod_{\mu=1}^{\infty} \left(1 - \frac{\sin^2\left(\frac{\pi x}{2\omega}\right)}{\sin^2\left(\pi \frac{\mu'\omega'}{\omega}\right)}\right). \end{aligned}$$

Die hierin auftretende Constante

$$\eta = \frac{\pi^2}{2\omega} \left(\frac{1}{6} + \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{1}{\sin^2\left(\pi \frac{\mu'\omega'}{\omega}\right)} \right),$$

ist nichts Anderes als $\frac{\sigma'(\omega)}{\sigma(\omega)}$. Denn wenn man in den letzten Formeln x um 2ω vermehrt, so bleibt unter den Productzeichen Alles ungeändert, aber $\sin\left(\frac{\pi x}{2\omega}\right)$ geht in $-\sin\left(\frac{\pi x}{2\omega}\right)$ und die Exponentialfunction in

$$e^{\eta \left(\frac{x}{2\omega}\right)^2} \cdot e^{2\eta(x+\omega)}$$

über, so daß auch hier die Gleichung

$$\sigma(x+2\omega) = -e^{2\eta(x+\omega)} \sigma(x)$$

hervorgeht.

Differentiirt man den vorletzten Ausdruck für $\sigma(x)$ logarithmisch, so erhält man nach Multiplication mit ω :

$$\omega \frac{\sigma'(x)}{\sigma(x)} = \eta x + \frac{\pi}{2} \cotg\left(\frac{\pi x}{2\omega}\right) + \frac{\pi}{2} \sum_{\mu=1}^{\infty} \left(\cotg \pi \left(\frac{\mu'\omega'}{\omega} + \frac{x}{2\omega} \right) - \cotg \pi \left(\frac{\mu'\omega'}{\omega} + \frac{x}{2\omega} \right) \right)$$

und diese Formel führt nach der Substitution $x = \omega'$ zu einem Ausdruck für

$$\omega \eta' - \eta \omega' = \mp m \frac{\pi i}{2}.$$

Dieser lautet:

$$\frac{\pi}{2} \cotg \left(\frac{\pi x}{2\omega} \right) + \frac{\pi}{2} \sum_{\mu=1}^{\infty} \left(\cotg \pi \frac{(2\mu'+1)\omega'}{2\omega} - \cotg \pi \frac{(2\mu'-1)\omega'}{2\omega} \right) \\ = \lim_{\mu'=\infty} \frac{\pi}{2} \cotg \pi \frac{(2\mu'+1)\omega'}{2\omega}.$$

Doch weil $\cotg(u + iv)$ nach $\pm i$ convergirt, je nachdem $v = \mp \infty$ wird, so wird

$$\omega \eta' - \eta \omega' = \pm \frac{\pi i}{2},$$

je nachdem in dem nicht reellen Quotienten $\frac{\omega'}{\omega} = \alpha + i\beta$ $\beta \leq 0$ oder

$$\Re \left(\frac{\omega'}{\omega i} \right) \leq 0$$

ist. Man übersieht nun auch, daß die Function $\sigma(x)$ ungeändert bleibt, wenn man 2ω und $2\omega'$ durch ein äquivalentes Größenpaar

$$2\omega = 2p\omega + 2q\omega', \quad 2\omega' = 2p'\omega + 2q'\omega' \quad (pq' - p'q = \pm 1)$$

ersetzt, dem

$$2\tilde{\eta} = 2p\eta + 2q\eta', \quad 2\tilde{\eta}' = 2p'\eta + 2q'\eta'$$

zuzuordnen ist, und daß bei positivem Werthe der Determinante $p'q - qp'$ auch

$$\omega \tilde{\eta}' - \tilde{\eta} \omega' = \pm \frac{\pi i}{2}$$

wird, wenn $\Re \left(\frac{\omega'}{\omega i} \right) \leq 0$ ist.

Die Ähnlichkeit der Darstellungen von

$$\sin \frac{x\pi}{2\omega} = \frac{x\pi}{2\omega} \prod_{\nu=1}^{\infty} \left(1 - \frac{\left(\frac{x\pi}{2\omega} \right)^2}{\nu^2 \pi^2} \right)$$

und von $\sigma(x)$ durch Sinusfunctionen springt in die Augen und führt auf die Vermuthung, daß $\sin \frac{x\pi}{2\omega}$ aus $\sigma(x)$ abgeleitet werden kann, wenn man ω' einen ausgezeichneten Werth beilegt. In der That: läßt man den positiven reellen Bestandtheil $\Re \left(\frac{\omega'}{\omega i} \right)$ über alle Grenzen wachsen (ohne ω unendlich klein werden zu lassen), so wird

$$\sin \left(\pi \frac{\mu' \omega'}{\omega} \right) = \frac{e^{-\mu' \pi \left(\frac{\omega'}{\omega i} \right)} - e^{\mu' \pi \left(\frac{\omega'}{\omega i} \right)}}{2i} = \frac{1}{2i} (e^{\mu' \pi (\alpha i - \beta)} - e^{-\mu' \pi (\alpha i - \beta)}) = \infty$$

und weil dann

$$\eta = \frac{\pi^2}{6} \frac{1}{2\omega}$$

ist, gilt die Gleichung

$$\sigma(x) = e^{\frac{1}{6} \left(\frac{\pi x}{2\omega} \right)^2} \frac{2\omega}{\pi} \sin \left(\frac{\pi x}{2\omega} \right)$$

und

$$\frac{\sigma'(x)}{\sigma(x)} = \frac{\pi}{2\omega} \cotg \left(\frac{\pi x}{2\omega} \right) + \frac{\pi^3}{12} \frac{x}{\omega^2}.$$

§ 53. Der Laurent'sche Satz.

Wir wenden uns wieder zu allgemein functionentheoretischen Fragen und vor Allem zu dem Laurent'schen Satze, der aussagt, daß man eine eindeutige analytische Function $f(x)$, die in der Umgebung jeder Stelle x_0 eines um einen Punkt $x = c$ gelegenen ringförmigen Gebietes, wo

$$R_1 < |x - c| < R_2$$

ist, regulären Verhaltens bleibt, daselbst einheitlich durch eine nach positiven und negativen Potenzen von $(x - c)$ fortschreitende Potenzreihe

$$\mathfrak{P}_1(x - c) + \frac{1}{x - c} \mathfrak{P}_2\left(\frac{1}{x - c}\right)$$

darstellbar ist.

Bei dem Beweise*) dieses Satzes kann man voraussetzen, daß $c = 0$ und $f(x)$ eine ungerade Function sei, die bei der Vertauschung von $-x$ mit x ihr Zeichen wechselt, weil jede Function $F(x)$ als Summe einer geraden und ungeraden Function

$$\frac{1}{2} (F(x) + F(-x)), \quad \frac{1}{2} (F(x) - F(-x))$$

und somit auch als Summe

$$f_1(x) + xf_2(x)$$

darzustellen ist, wo $f_1(x)$ und $f_2(x)$ ungerade Functionen bezeichnen. Sobald der Laurent'sche Satz für ungerade Functionen $f(x)$ bewiesen ist, gilt er allgemein.

Wenn wir außerdem $f(x)$ auf die Form bringen

$$\frac{1}{2} \left(f(x) + f\left(\frac{1}{x}\right) \right) + \frac{1}{2} \left(f(x) - f\left(\frac{1}{x}\right) \right)$$

und für die Functionen $f(x) + f\left(\frac{1}{x}\right)$ und $f(x) - f\left(\frac{1}{x}\right)$ die verlangte Entwicklung beweisen, haben wir wieder alles Nothwendige geleistet.

Wir setzen ferner fest, daß die Radien R_1 und R_2 des Ringgebietes, an dessen Stellen sich $f(x)$ regulär verhält, der Bedingung genügen

$$R_1 R_2 = 1,$$

denn andernfalls führt die Substitution $x = \sqrt{R_1 R_2} y$ zu einer Function von y , die in einem durch Radien r_1 und r_2 definirten Gebiete regulär ist, für welches $r_1 r_2 = 1$ gilt.

Sollte R_1 Null oder der größere Radius R_2 unendlich sein, so beschränke man das Gebiet zunächst auf ein anderes mit den Radien R_1' und R_2' und gehe von diesem zu einem neuen, wo $r_1' r_2' = 1$ ist.

*) Entnommen aus Schaeffer's Abhandlung: Acta mathematica. Bd. 4, p. 375.

Unter den ringförmigen Bereichen um die Stelle Null mit zwei Radien R_1, R_2 ($R_1 R_2 = 1$) wähle man ferner eines, bei dem der größere Radius

$$R_2 > 1 + \sqrt{2},$$

d. h. größer als die positive Wurzel der Gleichung $a - \frac{1}{a} = 2$. Dann ist

$$R_1 < \sqrt{2} - 1, \quad \frac{R_2}{R_1} > \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2} - 1}, \quad R_2 - \frac{1}{R_2} > 2.$$

Beschränkt man hierauf die Größe

$$z = x + \frac{1}{x}$$

auf den Bereich, wo $|z| < R_2 - \frac{1}{R_2}$, so wird

$$f(x) + f\left(\frac{1}{x}\right)$$

dasselbst eine eindeutige Function von z sein, denn jedem Werthe z_0 innerhalb des Kreises $R_2 - \frac{1}{R_2}$ um die Stelle $z = 0$ entsprechen nur x Werthe x_0 und $x'_0 = \frac{1}{x_0}$, in deren Umgebung $f(x)$ der Voraussetzung zufolge regulären Verhaltens ist. Es läßt sich deshalb

$$\varphi(z) = f(x) + f\left(\frac{1}{x}\right)$$

in der Umgebung jeder Stelle z_0 des genannten Bereiches nach Potenzen von $z - z_0$ entwickeln.

In der That kann man ja $x - x_0$ und $\frac{1}{x} - \frac{1}{x_0}$ und dann auch $f(x)$ und $f\left(\frac{1}{x}\right)$ in der Umgebung jeder von $z = \pm 2$ verschiedenen Stelle durch Potenzreihen nach $z - z_0$ ausdrücken. Und wenngleich die Entwicklung der Differenzen $(x - x_0)$ und $\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x_0}\right)$ in der Umgebung der Nullstellen der Discriminante unserer Gleichung zwischen x und z :

$$x^2 - xz + 1 = 0$$

d. h. in der Umgebung von $z = \pm 2$, dem $x_0 = x'_0 = \pm 1$ entspricht, nicht möglich ist, so ist $\varphi(z)$ daselbst trotzdem regulär, weil die Vereinigung der aus den Reihen

$$f(x) = \mathfrak{P}_1(x - 1) \quad \text{und} \quad f\left(\frac{1}{x}\right) = \mathfrak{P}_1\left(\frac{1}{x} - 1\right)$$

und

$$f(x) = \mathfrak{P}_2(x + 1) \quad \text{und} \quad f\left(\frac{1}{x}\right) = \mathfrak{P}_2\left(\frac{1}{x} + 1\right)$$

entstammenden Glieder

$$a_v^{(1)}(x - 1)^v \quad \text{und} \quad a_v^{(1)}\left(\frac{1}{x} - 1\right)^v$$

beziehungsweise

$$a_v^{(2)}(x + 1)^v \quad \text{und} \quad a_v^{(2)}\left(\frac{1}{x} + 1\right)^v$$

eine ganze rationale Function von $s-2$ oder $s+2$ wird. Man kann nämlich eine Summe

$$\sum_{\mu=1}^s A_{\mu} \left(x^{\mu} + \frac{1}{x^{\mu}} \right)$$

als rationale Function von s ausdrücken, da

$$x^{\mu} + \frac{1}{x^{\mu}} = s \left(x^{\mu-1} + \frac{1}{x^{\mu-1}} \right) - \left(x^{\mu-2} + \frac{1}{x^{\mu-2}} \right)$$

ist.

Darnach läßt sich $\varphi(s)$ innerhalb des Kreises $|s| = R_2 - \frac{1}{R_2}$ durch eine einzige Potenzreihe $\mathfrak{P}(s)$ und $f(x) + f\left(\frac{1}{x}\right)$ in dem Bereiche, wo

$$|x| + \left| \frac{1}{x} \right| < R_2 - \frac{1}{R_2},$$

durch die Reihe

$$\mathfrak{P}\left(x + \frac{1}{x}\right)$$

darstellen. Diese nach positiven und negativen Potenzen von x zu ordnende Reihe convergirt aber für alle Stellen des durch zwei Radien ϱ und $\frac{1}{\varrho}$ definirten Kreisringes, wo ϱ durch die wegen der Bedingung $R_2 > \sqrt{2} + 1$ stets vorkommende positive Wurzel der Gleichung

$$\varrho + \frac{1}{\varrho} = R_2 - \frac{1}{R_2}$$

bestimmt ist.

Wenn nun $f(x) + f\left(\frac{1}{x}\right)$ in dem Bereiche $\frac{1}{\varrho} < |x| < \varrho$ die verlangte Darstellung findet, so wird die Gleichung

$$f(x) + f\left(\frac{1}{x}\right) = \mathfrak{P}\left(x + \frac{1}{x}\right) = \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} a_{\mu} x^{\mu}$$

nach dem Princip der Fortsetzung auch in dem Gebiete

$$\frac{1}{R_2} < |x| < R_2$$

gelten.

Setzt man andererseits $x - \frac{1}{x} = \xi$,

so kann man die innerhalb des Kreises $|\xi| = R_2 - \frac{1}{R_2}$ eindeutige Function von ξ

$$\psi(\xi) = f(x) + f\left(-\frac{1}{x}\right)$$

durch eine Potenzreihe $\mathfrak{P}(\xi)$ und darnach $f(x) + f\left(-\frac{1}{x}\right)$ in unserem Kreisringe durch eine Reihe

$$\sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} b_{\mu} x^{\mu}$$

darstellen.

Dasselbe gilt für die Function

$$f(x) = \frac{1}{2} \left(f(x) + f\left(\frac{1}{x}\right) \right) + \frac{1}{2} \left(f(x) + f\left(-\frac{1}{x}\right) \right).$$

Sind die zwei ursprünglichen Radien R_1 und R_2 ($R_1 R_2 = 1$) an die neuen Ungleichungen geknüpft:

$$1 < \frac{R_2}{R_1} < \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{2}-1},$$

so kann man den neuen Fall auf den früheren zurückführen, indem man $f(x)$ durch eindeutige Functionen einer Variablen y ausdrückt, für die das zugehörige Ringgebiet, in welchem sie regulären Verhaltens sind, die frühere Bedingung erfüllt.

Ist die n^{te} Potenz von $\frac{R_2}{R_1}$ größer als $\frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{2}-1}$, so setze man $x^n = y$.

Bezeichnet dann α eine n^{te} primitive Einheitswurzel und führt man die n Functionen

$$f_\mu(x) = \frac{1}{n} \left(x^\mu f(x) + (\alpha x)^\mu f(\alpha x) + \dots + (\alpha^{n-1} x)^\mu f(\alpha^{n-1} x) \right) \\ (\mu = 0, 1, \dots, n-1)$$

ein, durch welche $f(x)$ in der Form

$$f(x) = \sum_{\mu=0}^{n-1} \frac{f_\mu(x)}{x^\mu}$$

auszudrücken ist, so sind die n Functionen f_μ in einem dem Kreisinge von $f(x)$ entsprechenden Bereiche der verlangten Beschaffenheit eindeutige Functionen von y , denn einem Werthe y_0 aus diesem Bereiche gehören n Werthe von x zu, die in dem regulären Gebiete von $f(x)$ liegen.

Da ferner jeder Bestandtheil $(\alpha^\nu x)^\mu f(\alpha^\nu x)$ von f_μ nach ganzen Potenzen von $x - x_0$ und $x - x_0$ nach ganzen Potenzen von $y - y_0$ zu entwickeln ist, so kann man jede der Functionen f_μ nach positiven Potenzen von $y - y_0$ nach positiven und negativen Potenzen von y darstellen. Setzt man wieder $y = x^n$, so ergeben sich für die n Functionen f_μ nach positiven und negativen Potenzen von x fortschreitende Reihen, und demgemäß wird $f(x)$ in dem Bereiche $R_1 < |x| < R_2$ in der Form

$$f(x) = \sum_{\mu=0}^{n-1} \frac{f_\mu(x)}{x^\mu} = \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} A_\mu x^\mu$$

zu entwickeln sein. Damit ist der Laurent'sche Satz in allen seinen Theilen bewiesen.

Die Reihe

$$\sum_{\mu=1}^{\infty} A_{-\mu} \left(\frac{1}{x}\right)^\mu$$

convergirt für alle Stellen der Umgebung R_1 des Punktes ∞ , und wenn R_1 kleiner ist als jede beliebig kleine GröÙe, so stellt diese Reihe offenbar eine beständig convergente d. h. ganze Function des Argumentes $\frac{1}{x}$ dar, die für $\frac{1}{x}=0$ verschwindet. Damit ist klar, daß eine eindeutige Function in der Umgebung jeder isolirten singulären Stelle c in der Form

$$G\left(\frac{1}{x-c}\right) + \mathfrak{P}(x-c)$$

darstellbar ist, wo G eine mit dem Argument verschwindende ganze rationale oder transcendente Function bezeichnet, je nachdem die Stelle c eine außerwesentlich oder wesentlich singuläre ist. Sobald c aber eine reguläre Stelle ist, muß $G\left(\frac{1}{x-c}\right)$ identisch verschwinden.

§ 54. Das Mittag-Leffler'sche Theorem.

Wir gehen nun zur Lösung der zweiten der zu Eingang dieses Capitels gestellten Aufgaben, *eine eindeutige analytische Function mit unendlich vielen vorgegebenen singulären Stellen, die eine Grenzstelle haben, als Summe solcher Functionen darzustellen, deren jede außer an einer Häufungsstelle nur an einer der gegebenen Stellen irregulären Verhaltens ist.**)

Wir zeigen zunächst, indem wir denselben Gang wie bei den ganzen Functionen einschlagen, daß man stets eine eindeutige analytische Function bilden kann, welche überall regulären Verhaltens ist, ausgenommen in der Umgebung der von einander verschiedenen Stellen

$$a_1, a_2, \dots a_r, \dots$$

mit der einzigen Häufungsstelle $x=b$, und welche in der Umgebung einer Stelle a_r in der Form

$$G_r\left(\frac{1}{x-a_r}\right) + \mathfrak{P}_r(x-a_r)$$

darstellbar ist, wo $G_r\left(\frac{1}{x-a_r}\right)$ eine vorgegebene ganze rationale oder transcendente Function des Argumentes $\frac{1}{x-a_r}$ bedeutet, die mit $\frac{1}{x-a_r}$ verschwindet.

Ist die Reihe singulärer Stellen a_r endlich, so gibt es keine Grenzstelle b und

$$F(x) = C + \sum_{r=1}^n G_r\left(\frac{1}{a-x_r}\right)$$

*) Siehe Weierstraß, Functionenlehre S. 53, und Mittag-Leffler, Acta mathematica Bd. 4.

ist eine analytische Function der verlangten Art. Umgekehrt ist jede eindeutige analytische Function mit den singulären Stellen $a_1, a_2, \dots a_n$ durch einen Ausdruck der genannten Art darstellbar, denn die eindeutige Function $F(x)$ verhält sich in der Umgebung der isolirten singulären Stelle a_v wie ein Ausdruck

$$G_v\left(\frac{1}{x-a_v}\right) + \mathfrak{P}_v(x-a_v),$$

wo G_v eine ganze rationale oder transcendente Function bezeichnet, je nachdem a_v eine auferwesentlich oder wesentlich singuläre Stelle ist. Die Differenz

$$F(x) - \sum_{v=1}^n G_v\left(\frac{1}{x-a_v}\right)$$

verhält sich dann überall regulär und kann daher nur eine Constante sein.

Der obige allgemeine Satz von Mittag-Leffler wird dadurch abgeleitet, daß man aus den gegebenen Functionen $G_v\left(\frac{1}{x-a_v}\right)$ eine Reihe anderer Functionen $F_v(x)$ dergestalt ableitet, daß jede Differenz

$$F_v(x) - G_v\left(\frac{1}{x-a_v}\right)$$

eine Function mit den zwei singulären Stellen a_v und b oder eine Constante wird und gleichzeitig die Summe $\sum_{v=1}^{\infty} F_v(x)$ in jedem Bereiche, der keine der Stellen a und b enthält, unbedingt und gleichmäßig convergirt. Dann ist nämlich diese Summe die verlangte Function und jede andere entsteht durch Addition einer ganzen Function $G\left(\frac{1}{x-b}\right)$. Weierstraßs nimmt eine unendliche Reihe positiver Größen $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots$ von endlicher Summe auf und eine positive Größe $\varepsilon < 1$, setzt dann, wenn $a_v = 0$ oder ∞ ist, $F_v(x) = G_v\left(\frac{1}{x-a_v}\right)$, entwickelt aber in jedem andern Falle die gegebene Function

$$G_v\left(\frac{1}{x-a_v}\right) = \frac{c_{-1}^{(v)}}{(x-a_v)} + \frac{c_{-2}^{(v)}}{(x-a_v)^2} + \frac{c_{-3}^{(v)}}{(x-a_v)^3} + \dots$$

in eine innerhalb des Bereiches $\left|\frac{a_v-b}{x-b}\right| < 1$ convergente Reihe

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} A_{\mu}^{(v)} \left(\frac{a_v-b}{x-b}\right)^{\mu},$$

die für $b = \infty$ die Form

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} A_{\mu}^{(v)} \left(\frac{x}{a_v}\right)^{\mu}$$

erhält und convergirt, solange $\left|\frac{x}{a_v}\right| < 1$.

Im ersten Falle ist

$$\begin{aligned} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{c_{-x}^{(\nu)}}{(x-a_{\nu})^x} &= \sum_{x=1}^{\infty} \frac{c_{-x}^{(\nu)}}{(a_{\nu}-b)^x} \left(\frac{a_{\nu}-b}{x-b}\right)^x \frac{1}{\left(1-\frac{a_{\nu}-b}{x-b}\right)^x} = \\ &= \sum_{x=1}^{\infty} \frac{c_{-x}^{(\nu)}}{(a_{\nu}-b)^x} \left(\frac{a_{\nu}-b}{x-b}\right)^x \left\{ 1 + \frac{x}{1} \left(\frac{a_{\nu}-b}{x-b}\right) + \frac{x(x+1)}{1 \cdot 2} \left(\frac{a_{\nu}-b}{x-b}\right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{x(x+1)(x+2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \left(\frac{a_{\nu}-b}{x-b}\right)^3 + \dots \right\} \end{aligned}$$

und die Coefficienten $A_{\mu}^{(\nu)}$ werden der Reihe nach

$$A_0^{(\nu)} = 0$$

$$A_1^{(\nu)} = \frac{c_{-1}^{(\nu)}}{a_{\nu}-b}$$

$$A_2^{(\nu)} = \frac{c_{-1}^{(\nu)}}{a_{\nu}-b} + \frac{c_{-2}^{(\nu)}}{(a_{\nu}-b)^2}$$

$$A_3^{(\nu)} = \frac{c_{-1}^{(\nu)}}{a_{\nu}-b} + \frac{2}{1!} \frac{c_{-2}^{(\nu)}}{(a_{\nu}-b)^2} + \frac{c_{-3}^{(\nu)}}{(a_{\nu}-b)^3}$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\begin{aligned} A_{\mu}^{(\nu)} &= \frac{c_{-1}^{(\nu)}}{a_{\nu}-b} + \frac{\mu-1}{1!} \frac{c_{-2}^{(\nu)}}{(a_{\nu}-b)^2} + \frac{(\mu-1)(\mu-2)}{2!} \frac{c_{-3}^{(\nu)}}{(a_{\nu}-b)^3} + \dots + \\ &\quad + \frac{(\mu-1)(\mu-2)\dots(\mu-(r-1))}{(r-1)!} \frac{c_{-r}^{(\nu)}}{(a_{\nu}-b)^r} + \dots + \frac{c_{-\mu}^{(\nu)}}{(a_{\nu}-b)^{\mu}} \end{aligned}$$

usw. Im zweiten Falle hingegen wird

$$\begin{aligned} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{c_{-x}^{(\nu)}}{(x-a_{\nu})^x} &= \sum_{x=1}^{\infty} (-1)^x \frac{c_{-x}^{(\nu)}}{a_{\nu}^x} \frac{1}{\left(1-\frac{x}{a_{\nu}}\right)^x} = \\ &= \sum_{x=1}^{\infty} \frac{(-1)^x c_{-x}^{(\nu)}}{a_{\nu}^x} \left\{ 1 + \frac{x}{1} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right) + \frac{x(x+1)}{1 \cdot 2} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right)^2 + \frac{x(x+1)(x+2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \left(\frac{x}{a_{\nu}}\right)^3 + \dots \right\} \end{aligned}$$

und nun gibt der Vergleich der Coefficienten

$$\begin{aligned} A_0^{(\nu)} &= \sum_{x=1}^{\infty} (-1)^x \frac{c_{-x}^{(\nu)}}{a_{\nu}^x}, \quad A_1^{(\nu)} = \sum_{x=1}^{\infty} (-1)^x \frac{x}{1!} \frac{c_{-x}^{(\nu)}}{a_{\nu}^x}, \\ A_2^{(\nu)} &= \sum_{x=1}^{\infty} (-1)^x \frac{x(x+1)}{2!} \frac{c_{-x}^{(\nu)}}{a_{\nu}^x}, \dots \\ \dots A_{\mu}^{(\nu)} &= \sum_{x=1}^{\infty} (-1)^x \frac{x(x+1)\dots(x+\mu-1)}{1 \cdot 2 \dots \mu} \frac{c_{-x}^{(\nu)}}{a_{\nu}^x} \\ &= \sum_{x=1}^{\infty} (-1)^x \frac{(\mu+1)(\mu+2)\dots(\mu+x-1)}{1 \cdot 2 \dots (x-1)} \frac{c_{-x}^{(\nu)}}{a_{\nu}^x}, \dots \end{aligned}$$

Ist dann b nicht unendlich, so kann man eine positive ganze Zahl m_v so bestimmen, daß der absolute Betrag der Reihe

$$F_v(x) = G_v\left(\frac{1}{x-a_v}\right) - \sum_{\mu=1}^{m_v} A_\mu^{(v)} \left(\frac{a_v-b}{x-b}\right)^\mu = \sum_{\mu=m_v+1}^{\infty} A_\mu^{(v)} \left(\frac{a_v-b}{x-b}\right)^\mu$$

an jeder Stelle des durch die Bedingung:

$$\left| \frac{a_v-b}{x-b} \right| \leq \varepsilon < 1$$

definierten Bereiches kleiner wird als ε_v , und ist $b = \infty$, so läßt sich m_v derart angeben, daß

$$|F_v(x)| = \left| G_v\left(\frac{1}{x-a_v}\right) - \sum_{\mu=0}^{m_v} A_\mu^{(v)} \left(\frac{x}{a_v}\right)^\mu \right| = \left| \sum_{\mu=m_v+1}^{\infty} A_\mu^{(v)} \left(\frac{x}{a_v}\right)^\mu \right|$$

an jeder Stelle des Bereiches $\left| \frac{x}{a_v} \right| \leq \varepsilon < 1$ kleiner wird als ε_v , und

$$\sum_{v=1}^{\infty} F_v(x)$$

ist die gesuchte Function.

Um zunächst ganze Zahlen m_v der geforderten Beschaffenheit zu finden, beachte man, daß $G_v\left(\frac{1}{x-a_v}\right)$ für jeden endlichen Werth des Argumentes unbedingt convergirt. Wenn man dann den Werth der Summe:

$$\sum_{x=1}^{\infty} \frac{|c_{-x}^{(v)}|}{\xi_v^x}$$

für einen positiven endlichen Werth von $\xi_v = |x - a_v|$ mit $g_\xi^{(v)}$ bezeichnet, so werden die Coefficienten $c_{-x}^{(v)}$ den Ungleichungen genügen:

$$|c_{-x}^{(v)}| \leq g_\xi^{(v)} \xi_v^x$$

und je nachdem b unendlich oder endlich ist, wird:

$$|A_\mu^{(v)}| \leq g_\xi^{(v)} \frac{\xi_v}{|a_v|} \left(1 - \frac{\xi_v}{|a_v|}\right)^{-(\mu+1)}$$

oder

$$|A_\mu^{(v)}| \leq g_\xi^{(v)} \frac{\xi_v}{|a_v-b|} \left(1 + \frac{\xi_v}{|a_v-b|}\right)^{\mu-1}.$$

Wählt man in dem Falle $b = \infty$ eine positive Gröfse β den Bedingungen gemäß

$$\beta < 1 \quad \text{und} \quad \frac{\varepsilon}{1-\beta} < 1$$

und die Gröfse ξ_v so, daß

$$\frac{\xi_v}{|a_v|} < \beta,$$

und versteht unter ε_0 eine positive Gröfse, die kleiner als 1, aber

größer als $\frac{\varepsilon}{1-\beta}$ ist, so wird in dem Bereiche $\left| \frac{x}{a_\nu} \right| < \varepsilon$

$$\sum_{\mu=m_\nu+1}^{\infty} \left| A_\mu^{(\nu)} \left(\frac{x}{a_\nu} \right)^\mu \right| < \frac{g_\xi^{(\nu)} \beta}{1-\beta} \frac{\varepsilon_0^{m_\nu+1}}{1-\varepsilon_0},$$

denn es ist schon

$$\sum_{\mu=m_\nu+1}^{\infty} \left| A_\mu^{(\nu)} \left(\frac{x}{a_\nu} \right)^\mu \right| \leq \frac{g_\xi^{(\nu)} \beta}{1-\beta} \left(\frac{\varepsilon}{1-\beta} \right)^{m_\nu+1} \frac{1}{1-\frac{\varepsilon}{1-\beta}}$$

und man sieht, daß man m_ν nur der Bedingung

$$\frac{g_\xi^{(\nu)} \beta}{1-\beta} \frac{\varepsilon_0^{m_\nu+1}}{1-\varepsilon_0} < \varepsilon_\nu$$

zu unterwerfen hat, um in der zugehörigen Function $F_\nu(x)$ eine der gesuchten Art zu besitzen.

Ist b endlich, so wähle man eine positive GröÙe α derart, daß

$$\frac{1}{1+\alpha} > \varepsilon \quad \text{und} \quad |x - a_\nu| = \xi_\nu < |a_\nu - b| \alpha$$

ist, dann wird für jeden Werth des Bereiches $\left| \frac{a_\nu - b}{x - b} \right| < \varepsilon$

$$\sum_{\mu=m_\nu+1}^{\infty} \left| A_\mu^{(\nu)} \left(\frac{a_\nu - b}{x - b} \right)^\mu \right| \leq g_\xi^{(\nu)} \frac{\alpha}{1+\alpha} \frac{((1+\alpha)\varepsilon)^{m_\nu+1}}{1-(1+\alpha)\varepsilon}$$

und umsomehr

$$< g_\xi^{(\nu)} \frac{\alpha}{1+\alpha} \frac{\varepsilon_0^{m_\nu+1}}{1-\varepsilon_0},$$

wenn nur ε_0 eine positive GröÙe kleiner als 1 und größer als $(1+\alpha)\varepsilon$ bezeichnet. Die Zahl m_ν suche man daher aus der Ungleichung:

$$g_\xi^{(\nu)} \frac{\alpha}{1+\alpha} \frac{\varepsilon_0^{m_\nu+1}}{1-\varepsilon_0} < \varepsilon_\nu.$$

Ist hierauf x_0 eine von den gegebenen Stellen a_1, a_2, \dots und b verschiedene Stelle, so gibt es auch einen endlichen Bereich $|x - x_0| \leq \varrho$, der keine dieser Stellen enthält. Bezeichnet dann δ eine beliebig kleine positive GröÙe, so wird man schließlich eine ganze Zahl n so bestimmen können, daß für jeden Werth des Bereiches $|x - x_0| \leq \varrho$

$$\left| \frac{a_{n+\nu} - b}{x - b} \right| < \varepsilon \quad (\nu = 1, 2, \dots)$$

wird, denn es war ja $\lim |a_\nu - b| = 0$ und $x - b$ sinkt nicht unter jeden Grad der Kleinheit herab. Weil daselbst auch

$$|F_{n+\nu}(x)| < \varepsilon_{n+\nu} \quad (\nu = 1, 2, \dots),$$

so leuchtet ein, daß man n gemäß der für die gleichmäßige Conver-

genz der Reihe $\sum_{\nu=1}^{\infty} F_{\nu}(x)$ nothwendigen Bedingungen wählen kann; d. h. entsprechend der Ungleichung:

$$\left| \sum_{\nu=1}^{\infty} F_{n+\nu}(x) \right| < \delta.$$

Deshalb aber convergirt auch die um eine endliche Anzahl von Gliedern $F_{\nu}(x)$ vermehrte Summe

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} F_{\nu}(x)$$

in einer Umgebung der Stelle x_0 gleichmäfsig und läfst sich dort in eine Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x|x_0)$$

entwickeln und definirt somit wirklich eine analytische Function $F(x)$.

Ist keine der Stellen a_{ν} und auch b nicht unendlich, so kann man diese Function $F(x)$ in der Umgebung $x = \infty$ durch eine Reihe $\mathfrak{P}\left(\frac{1}{x}\right)$ darstellen; aber in einem Bereiche:

$$|x - a_{\mu}| < \varrho_{\mu},$$

der aufser a_{μ} keine andere Stelle a_{μ} enthält, wird die Differenz

$$F(x) - F_{\mu}(x)$$

durch eine Potenzreihe $\mathfrak{P}(x|a_1)$ zu definiren sein, d. h. man hat daselbst

$$\begin{aligned} F(x) &= G_1\left(\frac{1}{x-a_1}\right) + \mathfrak{P}(x|a_1) - \sum_{\mu=1}^{m_1} A_{\mu}^{(w)} \left(\frac{a_1-b}{x-b}\right)^{\mu} \\ &= G_1\left(\frac{1}{x-a_1}\right) + \mathfrak{P}_1(x|a_1), \end{aligned}$$

und falls $a_1 = \infty$ ist,

$$F(x) = G_1(x) + \mathfrak{P}_1\left(\frac{1}{x}\right).$$

Darnach besitzt die Function $F(x)$ in der That das genannte Verhalten und definirt eine eindeutige analytische Function mit den unendlich vielen singulären Stellen a_{ν} und b , von denen a_{ν} je nach der Beschaffenheit der ganzen Functionen $G_{\nu}\left(\frac{1}{x-a_{\nu}}\right)$ eine aufserwesentlich oder wesentlich singuläre Stelle sein wird.*)

Bei der Construction von $F(x)$ blieben noch unendlich viele Gröfsen gewissermafsen willkürlich, darum gibt es auch unendlich viele Functionen der verlangten Art. Die Addition einer überall aufser in

*) Vergl. auch Casorati, Aggiunte a recenti lavori dei Signori Weierstraß e Mittag-Leffler (Annali di matematica pura ed applicata serie II^a, tomo X.

b regulären Function zu $F(x)$ — und das muß eine ganze Function $G\left(\frac{1}{x-b}\right)$ sein — gibt wieder eine Function derselben Beschaffenheit. Indem man $G\left(\frac{1}{x-b}\right)$ noch in eine gleichmäßig convergente Summe ganzer Functionen $g_v\left(\frac{1}{x-b}\right)$ zerlegt und $F_v(x) + g_v$ mit $\Phi_v(x)$ bezeichnet, erscheint auch die neue Function als Summe unendlich vieler Functionen, deren jede außer b nur eine singuläre Stelle a_v besitzt.

Ist umgekehrt eine eindeutige analytische Function $F(x)$ gegeben, deren Stetigkeitsbereich durch die Stellen

$$a_1, a_2, a_3, \dots$$

und die Häufungsstelle b begrenzt ist, und die ferner in der Umgebung der isolirten singulären Stelle a_v in der Form

$$G_v\left(\frac{1}{x-a_v}\right) + \mathfrak{P}_v(x-a_v)$$

darstellbar ist, wo G_v eine mit dem Argument $\frac{1}{x-a_v}$ verschwindende ganze rationale oder transcendente Function bezeichnet, je nachdem a_v aufserwesentlich oder wesentlich singulär ist, so leite man aus den Functionen G_v in der angegebenen Weise die Functionen $F_v(x)$ und dann $\sum_{v=1}^{\infty} F_v(x)$ ab. Darauf wird

$$F(x) - \sum_{v=1}^{\infty} F_v(x)$$

nur eine ganze Function $G\left(\frac{1}{x-b}\right)$ sein. Nach der Zerlegung

$$G\left(\frac{1}{x-b}\right) = \sum_{v=1}^{\infty} g_v\left(\frac{1}{x-b}\right)$$

und der Vereinigung $F_v(x) + g_v\left(\frac{1}{x-b}\right) = \Phi_v(x)$ wird die gegebene Function $F(x)$ durch eine unendliche Summe analytischer Functionen dargestellt, deren jede neben b nur eine einzige singuläre Stelle a_v besitzt. Damit ist der zu Beginn dieses Paragraphen verlangte Satz in dem Umfange bewiesen, daß die Stellen a_v auch wesentlich singulär sein können.

Wir machen noch eine Bemerkung über die Ermittlung der ganzen Zahlen m_v . Die eindeutige Function $F(x)$ besitze die unendlich vielen aufserwesentlich singulären Stellen erster Ordnung

$$a_1, a_2, \dots, a_v, \dots$$

unter denen die Null nicht vorkommen soll, und die wesentlich singuläre Stelle ∞ . Heißen ferner die den Stellen a_v zugeordneten Functionen

$$G_v \left(\frac{1}{x - a_v} \right) = \frac{c_{-1}^{(v)}}{(x - a_v)},$$

so bilde man

$$F_v(x) = \frac{c_{-1}^{(v)}}{x - a_v} - \sum_{\mu=0}^{m_v-1} A_{\mu}^{(v)} \left(\frac{x}{a_v} \right)^{\mu} = \frac{c_{-1}^{(v)} x^{m_v}}{a_v^{m_v} (x - a_v)}.$$

Wir wissen bereits, daß $\sum_{v=1}^{\infty} F_v(x)$ gleichmäßig convergirt, wenn m_v diejenigen ganzen Zahlen sind, für welche

$$\sum_{v=1}^{\infty} \left| \frac{1}{a_v} \left(\frac{x}{a_v} \right)^{m_v} \right| \quad (\alpha)$$

beständig convergirt. Wenn also a_1, a_2, \dots die Nullstellen einer ganzen Function m^{ten} Ranges sind, so hat die Function mit den außerwesentlich singulären Stellen erster Ordnung (a_1, a_2, \dots) die Gestalt:

$$F(x) = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{c_{-1}^{(v)} x^{m_v}}{a_v^{m_v} (x - a_v)} + G(x),$$

und darin bezeichnet $c_{-1}^{(v)}$ den Coefficienten von $(x - a_v)^{-1}$ in der Entwicklung der Function $F(x)$ um die Stelle a_v .

Sind die den singulären Stellen einer gegebenen Function $F(x)$ zugeordneten Functionen

$$G_v \left(\frac{1}{x - a_v} \right) = \frac{c_{-k}^{(v)}}{(x - a_v)^k}$$

• und ist die Bedingung (α) erfüllt, so kann man bei der Bildung von

$$F_v(x) = G_v \left(\frac{1}{x - a_v} \right) - \sum_{\mu=0}^{m'_v} A_{\mu}^{(v)} \left(\frac{x}{a_v} \right)^{\mu}$$

$m'_v = m_v - k$ setzen. *)

Man kann jetzt die frühere Function $p(x)$ auch durch die Forderung einführen: es ist eine Function herzustellen, welche an allen Stellen

$$w = 2\mu\omega + 2\mu'\omega', \quad \mu, \mu' = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

unendlich wird wie $\frac{1}{(x-w)^2}$. Sie muß dann die Form haben:

$$\frac{1}{x^2} + \sum_{\mu, \mu'} \left(\frac{1}{(x-w)^2} - \frac{1}{w^2} \right) + G(x).$$

*) Diese Wahl der Größen m'_v ist mit der Bemerkung zu begründen, daß die Function $F(x)$ mit der $(k-1)^{\text{ten}}$ Derivirten der logarithmischen Ableitung von

$$G(x) = \prod_{v=1}^{\infty} \left(1 - \frac{x}{a_v} \right) \sum_{\mu=1}^{m_v} \frac{1}{\mu} \left(\frac{x}{a_v} \right)^{\mu}$$

— abgesehen von den Coefficienten $c_{-k}^{(v)}$ — übereinkommt.

Wenn noch verlangt wird, daß diese Function doppeltperiodisch ist, kann $G(x)$ — wie wir später sehen werden — nur eine Constante sein, und diese ist Null zu setzen, wenn man z. B. annimmt, daß

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left(p(x) - \frac{1}{x^2} \right) = 0$$

wird.

Eine andere Anwendung bestehe in der Darstellung der Function $\pi \sec \pi x$ als Summe rationaler Functionen.

Weil die Entwicklung von $\cos \pi x$ in der Umgebung der Nullstelle $x = \frac{2\nu+1}{2}$ mit dem Gliede

$$\pi (-1)^{\nu+1} \left(x - \frac{2\nu+1}{2} \right) = \left(\frac{d \cos \pi x}{dx} \right)_{x = \frac{2\nu+1}{2}} \left(x - \frac{2\nu+1}{2} \right)$$

beginnt, wird die der Unendlichkeitsstelle $x = \frac{2\nu+1}{2}$ von $\pi \sec \pi x$ zugehörige Function:

$$G_{\nu} \left(\frac{1}{x - \frac{2\nu+1}{2}} \right) = \frac{(-1)^{\nu+1}}{\left(x - \frac{2\nu+1}{2} \right)}$$

und somit

$$\begin{aligned} \pi \sec \pi x &= \sum_{\nu=-\infty}^{+\infty} \frac{(-1)^{\nu+1} x}{\frac{2\nu+1}{2} \left(x - \frac{2\nu+1}{2} \right)} + G(x) \\ &= \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\nu} 2x^2}{\left(\frac{2\nu+1}{2} \right) \left(\left(\frac{2\nu+1}{2} \right)^2 - x^2 \right)} + G(x), \end{aligned}$$

doch hierin kann $G(x)$ nur eine Constante und zwar π sein.

Entwickelt man dann in:

$$\sec x = 1 + \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\nu} 2x^2}{\pi \left(\frac{2\nu+1}{2} \right) \left(\left(\frac{2\nu+1}{2} \right)^2 \pi^2 - x^2 \right)}$$

jedes einzelne Glied nach Potenzen von x^2 und summirt alle Potenzreihen, so erhält man

$$\sec x = 1 + \sum_{\mu=1}^{\infty} \left(\frac{2^{2\mu+2}}{\pi} \left(\frac{x}{\pi} \right)^{2\mu} \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\nu}}{(2\nu+1)^{2\mu+1}} \right).$$

Die hier auftretenden Summen:

$$\frac{1}{1^{2\mu+1}} - \frac{1}{3^{2\mu+1}} + \frac{1}{5^{2\mu+1}} + \dots$$

bestimme man dadurch, daß man den Quotienten

$$\frac{1}{\sum_{\nu=0}^{\infty} (-1)^{\nu} \frac{x^{2\nu}}{(2\nu)!}} = \frac{1}{\cos x}$$

in der Umgebung der Stelle $x=0$ in eine Potenzreihe entwickelt und die Coefficienten gleichnamiger Glieder vergleicht.

Dabei wird

$$\sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\nu}}{(2\nu+1)^3} = \frac{\pi^3}{2^3}, \quad \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\nu}}{(2\nu+1)^5} = \frac{5}{3} \frac{\pi^5}{2^5}, \dots$$

§ 55. Erweiterung des Mittag-Leffler'schen Theorems.*)

Der obige Mittag-Leffler'sche Satz läßt sich auf den Fall ausdehnen, wo in dem Bereich der unbeschränkten Variablen x irgend eine isolirte Punktmenge Q gegeben ist:

$$a_1, a_2, \dots, a_\nu, \dots$$

und eine Reihe ganzer rationaler oder transcender Functionen

$$G_1\left(\frac{1}{x-a_1}\right), G_2\left(\frac{1}{x-a_2}\right), G_3\left(\frac{1}{x-a_3}\right), \dots,$$

die mit dem Argumente verschwinden. Auch dann gibt es eine in der Umgebung jeder, weder der Menge Q , noch deren abgeleiteter Punktmenge Q' angehörigen Stelle x_0 reguläre Function $F(x)$, die in der Umgebung jeder isolirten Stelle a_ν in der Form

$$G_\nu\left(\frac{1}{x-a_\nu}\right) + \mathfrak{P}_\nu(x-a_\nu)$$

darstellbar ist.

Enthält Q' nicht wie früher eine einzige Stelle, so kommt es offenbar darauf an, die Menge Q derart abzutheilen, daß zu jeder Theilmenge Q_μ oder

$$a_1^{(\mu)}, a_2^{(\mu)}, \dots, a_\nu^{(\mu)}, \dots$$

eine Häufungsstelle b_μ gehört und diese Menge der Bedingung

$$\lim_{\nu=\infty} |a_\nu^{(\mu)} - b_\mu| = 0$$

gemäß geordnet werden kann, oder daß man nach Annahme einer beliebig kleinen Größe Θ_μ ein n finden kann, für welches

$$|a_{n+\nu}^{(\mu)} - b_\mu| < \Theta_\mu \quad (\nu = 0, 1, 2, \dots),$$

denn dann läßt sich jede Theilmenge Q_μ und die Reihe zugeordneter Functionen $G_\nu^{(\mu)}\left(\frac{1}{x-a_\nu^{(\mu)}}\right)$ zur Construction einer Function $F^{(\mu)}(x)$ mit

den singulären Stellen $a_\nu^{(\mu)}$ ($\nu = 1, 2, \dots$) und b_μ verwenden und es steht zu vermuthen, daß

$$\sum_{\mu} F^{(\mu)}(x)$$

eine Function der verlangten Art sein wird. Wenn Q' nur aus einer

*) Siehe Mittag-Leffler a. a. O.

endlichen Anzahl von Stellen b_μ besteht, ist die besagte Theilung von Q in Mengen Q_μ gewiss möglich und die Summe einer endlichen Anzahl von Functionen $F^{(\mu)}(x)$ gibt gewiss eine an jeder nicht in der Punktmenge $Q + Q'$ enthaltenen Stelle reguläre Function.

Besteht aber die Punktmenge Q' aus unendlich vielen Stellen, so ordne man am besten jeder Stelle a_ν eine von Q' b_ν derart zu, daß

$$\lim_{\nu \rightarrow \infty} |a_\nu - b_\nu| = 0 \quad \text{oder} \quad |a_\nu - b_\nu| < \Theta \quad (\nu \geq n)$$

wird. Das ist möglich, denn sind die Stellen von Q' kurzweg b genannt, so gehört zunächst jeder Stelle a_ν eine untere von Null verschiedene Grenze ϱ_ν des absoluten Betrages

$$|a_\nu - b|$$

zu. Diese wird erreicht, d. h. es gibt eine Stelle b_ν , wo $|a_\nu - b_\nu| = \varrho_\nu$ ist. Gibt es nämlich unendlich viele Stellen

$$b_1^{(1)}, b_2^{(2)}, \dots, b_\nu^{(\nu)} \dots$$

und definiren die absoluten Beträge $|a_\nu - b_\nu^{(\mu)}|$ die Grenze ϱ_ν , so ist die Häufungsstelle der $b_\nu^{(\mu)}$, die als eine der zweiten abgeleiteten Punktmenge von Q angehörige Stelle auch in Q' enthalten ist, die verlangte Stelle b_ν .

Gerade eine solche Stelle b_ν ordne man a_ν zu. Dann kann man nach Annahme einer beliebig kleinen Gröfse Θ nicht mehr unendlich viele Stellen a'_ν angeben, für welche die zugehörigen unteren Grenzen $\varrho'_\nu = |a'_\nu - b|$ gleich oder gröfser wären als Θ , denn diese würden eine Grenzstelle b' definiren und $|a'_\nu - b'|$ wäre für unendlich viele a'_ν kleiner als eine beliebig kleine Gröfse und kleiner als Θ . Darum gibt es in der That auch eine ganze Zahl n , sodafs

$$\varrho_\nu = \Theta \quad \text{oder} \quad |a_\nu - b_\nu| < \Theta,$$

sobald $\nu \geq n$ ist. *)

Nach dieser Bestimmung der Stellen b_ν entwickle man die Function $G_\nu \left(\frac{1}{x - a_\nu} \right)$ in eine Reihe:

$$G_\nu \left(\frac{1}{x - a_\nu} \right) = \sum_{x=1}^{\infty} \frac{c_x^{(\nu)}}{(x - a_\nu)^x} = \sum_{\mu=0}^{\infty} A_\mu^{(\nu)} \left(\frac{a_\nu - b_\nu}{x - b_\nu} \right)^\mu,$$

die in dem Bereiche $\left| \frac{a_\nu - b_\nu}{x - b_\nu} \right| < 1$ convergirt, suche wie früher eine ganze Zahl m_ν derart, daß

$$\left| \sum_{\mu=m_\nu+1}^{\infty} A_\mu^{(\nu)} \left(\frac{a_\nu - b_\nu}{x - b_\nu} \right)^\mu \right|$$

in dem Bereiche $\left| \frac{a_\nu - b_\nu}{x - b_\nu} \right| \leq \varepsilon < 1$ kleiner wird als ε_ν , setze endlich

*) Natürlich kann unendlich vielen Stellen a_ν dieselbe Stelle b_ν zugehören.

$$F_\nu(x) = G_\nu\left(\frac{1}{x-a_\nu}\right) - \sum_{\mu=0}^{m_\nu} A_\mu^{(\nu)} \left(\frac{a_\nu-b_\nu}{x-b_\nu}\right)^\mu,$$

so ist

$$F(x) = \sum_{\nu=1}^{\infty} F_\nu(x)$$

der Ausdruck, welcher in der Umgebung jeder von der Menge $Q+Q'$ verschiedenen Stelle x_0 regulären Verhaltens ist und in der Umgebung einer Stelle der isolirten Punktmenge Q durch

$$G_\nu\left(\frac{1}{x-a_\nu}\right) + \beta_\nu(x-a_\nu)$$

dargestellt wird. Jeder andere Ausdruck gleicher Art entsteht aus $F(x)$ durch Addition eines neuen analytischen Ausdruckes, der nur an den Stellen von Q' nicht regulären Verhaltens ist.

Zum Beweise zeige man, daß in einer Umgebung ϱ von x_0 , die keine Stelle der Menge $Q+Q'$ enthält, $F(x)$ gleichmäßig convergirt.

Nennt man die untere Grenze aller Werthe $|x-b|$ l , wo x jede Stelle des Bereiches $|x-x_0| < \varrho$ bedeutet, so daß also

$$|x-b_\nu| \geq l \quad (\nu = 1, 2, 3 \dots),$$

und setzt $\varepsilon l = \Theta$, so wird für alle Werthe $\nu \geq n$, für die $|a_\nu-b_\nu| < \Theta$ ist,

$$\left| \frac{a_\nu-b_\nu}{x-b_\nu} \right| < \frac{\Theta}{l} = \varepsilon.$$

Weil daselbst

$$|F_\nu(x)| < \varepsilon_\nu,$$

so leuchtet ein, daß bei einer endlichen Summe $\sum_{\nu=1}^n \varepsilon_\nu$ die Reihe $\sum_{\nu=1}^{\infty} F_\nu(x)$ gleichmäßig convergiren wird, denn man kann n so wählen, daß

$$\sum_{\nu=n'}^{\infty} |F_\nu(x)| \quad (n' \geq n)$$

für alle Stellen der Umgebung ϱ von x_0 kleiner wird als eine beliebig kleine vorgegebene GröÙe δ .

Da aber auch die Differenz

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} F_\nu(x) - F_1(x)$$

in der Umgebung von a_1 gleichmäßig convergirt, besitzt die analytische Function $F(x) = \sum_{\nu=1}^{\infty} F_\nu(x)$ und endlich $F(x) + \Phi(x)$ die genannten Eigenschaften, wenn $\Phi(x)$ nur mehr an den Stellen b_ν irregulär ist.

Besteht der Bereich der gleichmäßigen Convergenz eines der gefundenen Ausdrücke aus einem Continuum, so kann man jedes seiner Elemente $\mathfrak{P}(x|x_0)$ aus jedem anderen ableiten, folglich stellt der Ausdruck innerhalb des Continuum eine monogene Function dar. Bildet die Punktmenge $Q + Q'$ die Begrenzung mehrerer Continua, die wohl gemeinsame Grenzstellen haben können, aber aus deren Innerem kein continuirlicher Übergang in ein nächstes Continuum zu bewerkstelligen ist, so wird der Ausdruck in dem einzelnen Bereiche eine monogene Function vollständig oder bloß einen Theil einer solchen darstellen. Liegen z. B. die Stellen der Menge $(Q + Q')$ alle in einem Kreise $|x - a| = r$ und auf dessen Begrenzung, und kann man aus dem Innern desselben nicht nach den außerhalb liegenden Stellen gelangen, verschwinden ferner die Functionen $G_r\left(\frac{1}{x - a_r}\right)$ nicht identisch, so wird $F(x)$ innerhalb des Kreises eine monogene Function vollständig darstellen; ob aber $F(x)$ außerhalb des Kreises auch eine eindeutige monogene Function darstellt, die nicht in das Innere desselben fortzusetzen ist, das ist noch nicht entschieden.

Angenommen, es sei bewiesen, daß es stets eine eindeutige analytische Function gebe, die innerhalb eines von einer Punktmenge $Q_1 + Q_1'$ vollständig begrenzten Continuum regulär und an jeder Stelle a , der isolirten Menge Q_1 in der Form

$$G_r\left(\frac{1}{x - a_r}\right) + \mathfrak{P}_r(x - a_r)$$

darstellbar ist, wo G_r eine nicht identisch verschwindende ganze Function bedeutet, die für $\frac{1}{x - a_r} = 0$ Null ist, so kann man zu der früheren Menge $Q + Q'$ zurückkehrend folgende Fälle unterscheiden. Es ist möglich, daß eine Theilmenge $Q_1 + Q_1'$ von $Q + Q'$ für sich ein Continuum \mathfrak{A}_1 vollständig begrenzt, dann existirt innerhalb \mathfrak{A}_1 eine monogene Function $F_1(x)$, deren singuläre Stellen diejenigen der Menge $Q_1 + Q_1'$ sind. Enthält nun $Q + Q'$ eine zweite Theilmenge $Q_2 + Q_2'$, die für sich ein anderes Continuum \mathfrak{A}_2 vollständig begrenzt, das aber theilweise mit \mathfrak{A}_1 zusammenfällt oder \mathfrak{A}_1 ganz enthält, so existirt vor Allem eine monogene Function $F_2(x)$ innerhalb \mathfrak{A}_2 , ferner gibt es innerhalb der Bereiche \mathfrak{B}_1 und \mathfrak{B}_2 , die aus \mathfrak{A}_1 und \mathfrak{A}_2 entstehen, wenn man den \mathfrak{A}_1 und \mathfrak{A}_2 gemeinsamen Bereich \mathfrak{C}_1 von \mathfrak{A}_1 und \mathfrak{A}_2 in Abzug bringt, zwei Functionen $F_3(x)$ und $F_4(x)$, und endlich existirt auch eine monogene Function innerhalb \mathfrak{C}_1 .

Da kann nun der Fall eintreten, daß ein einziger Ausdruck $F(x)$, wenn er in \mathfrak{A}_1 $F_1(x)$ darstellt, gleichzeitig $F_1(x)$ darstellen muß oder daß ein Ausdruck $F_3(x)$, $F_5(x)$, $F_4(x)$, oder innerhalb \mathfrak{B}_1 , \mathfrak{C}_1 und \mathfrak{B}_2 $F_1(x)$, $F_5(x)$, $F_2(x)$ darstellen wird.

Um uns über diese Möglichkeiten zu orientiren, beweisen wir den eben genannten Satz über die Existenz einer monogenen Function $F_1(x)$, deren singuläre Stellen $(Q_1 + Q_1')$ einen Bereich \mathfrak{A}_1 vollständig begrenzen, außerhalb dessen aber noch Stellen existiren, und suchen hinterher Ausdrücke zu bilden, welche in verschiedenen Bereichen ihrer gleichmäßigen Convergenz analytische Functionen vollständig oder nur theilweise darstellen.

Wenn man beweisen will, daß innerhalb eines Bereiches \mathfrak{A}_1 eine monogene Function $F_1(x)$ existirt, kann man festsetzen, daß $F_1(x)$ außerhalb \mathfrak{A}_1 nicht regulär sei.

Bezeichnet man mit b_1, b_2, b_3, \dots außerhalb $\mathfrak{A}_1 + Q_1$ oder auf der Begrenzung dieses Bereiches liegende Punkte und nennt b die Punkte von Q_1' d. h. die Begrenzungspunkte von $\mathfrak{A}_1 + Q_1$, und heißt die untere Grenze von $|b - b_\nu|$ β_ν , so kann man die Stellen b_ν derart wählen, daß die obere Grenze β der β_ν eine bestimmte endliche GröÙe wird und daß nach Annahme einer beliebig kleinen GröÙe ϑ auch ein n gefunden werden kann, für welches

$$|a_\nu - b_\nu| - \beta_\nu < \vartheta,$$

sobald $\nu \geq n$ ist.

Falls die Stellen b_ν alle der Punktmenge Q_1' angehören, werden wie früher alle β_ν Null zu setzen sein.

Bezeichnet

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_\nu, \dots$$

wieder eine Reihe positiver GröÙen von endlicher Summe und wählt man anstatt der einzigen GröÙe $\varepsilon < 1$ eine unendliche Reihe positiver GröÙen

$$\varepsilon^{(1)}, \varepsilon^{(2)}, \dots, \varepsilon^{(\nu)}, \dots,$$

für welche $\lim \varepsilon^{(\nu)} = 1$ ist, so bilde man aus den unseren Stellen a_ν zugeordneten (nicht identisch verschwindenden) ganzen Functionen $G_\nu \left(\frac{1}{x - a_\nu} \right) F_\nu(x)$ dadurch, daß man die Zahlen m_ν nunmehr der Bedingung gemäß bestimmt: es soll

$$\left| \sum_{\mu=m_\nu+1}^{\infty} A_\mu^{(\nu)} \left(\frac{a_\nu - b_\nu}{x - b_\nu} \right)^\mu \right| < \varepsilon_\nu,$$

sobald $\left| \frac{a_\nu - b_\nu}{x - b_\nu} \right| \leq \varepsilon^{(\nu)}$. Zu diesem Zwecke hat man ebenso wie früher (S. 347 und 348), aber entsprechend den verschiedenen GröÙen $\varepsilon^{(\nu)}$ verschiedene HilfsgröÙen $\beta^{(\nu)}$ und $\alpha^{(\nu)}$ einzuführen.

Ist $b_\nu = \infty$, so entnehme man m_ν der Ungleichung

$$g_\xi^{(\nu)} \frac{\beta^{(\nu)}}{1 - \beta^{(\nu)}} \frac{(\varepsilon_0^{(\nu)})^{m_\nu+1}}{1 - \varepsilon_0^{(\nu)}} < \varepsilon_\nu,$$

und wenn b_ν endlich ist, der Ungleichung

$$g_{\xi}^{(\nu)} \frac{\alpha^{(\nu)}}{1 + \alpha^{(\nu)}} \frac{(\varepsilon_0^{(\nu)})^{m_{\nu}+1}}{1 - \varepsilon_0^{(\nu)}} < \varepsilon_{\nu},$$

wo die Bedeutung und Beschaffenheit der Gröfßen $g_{\xi}^{(\nu)}$, $\beta^{(\nu)}$, $\alpha^{(\nu)}$ und $\varepsilon^{(\nu)}$ nicht mehr erklärt zu werden braucht.

Bezeichnet dann x_0 eine Stelle von $\mathfrak{A}_1 + Q_1$ und enthält der Bereich $|x - x_0| \leq \varrho$ keine Stelle von $Q_1 + Q_1'$, aufser etwa x_0 , so kann man eine ganze Zahl n derart finden, dafs $\left| \frac{a_{\nu} - b_{\nu}}{x - b_{\nu}} \right|$ für alle Stellen dieses Bereiches kleiner wird als $\varepsilon^{(\nu)}$, wenn nur $\nu \geq n$ ist.

In der That: durchläuft x wieder alle Werthe des genannten Bereiches und sucht man die untere Grenze l von

$$|x - b_{\nu}| - \beta_{\nu} \quad (\nu = 1, 2, \dots),$$

so ist

$$|x - b_{\nu}| \geq \beta_{\nu} + l$$

für alle x -Werthe des Bereiches $|x - x_0| \leq \varrho$. Ist dann $\Theta < l$, so wird

$$|a_{\nu} - b_{\nu}| < \beta_{\nu} + \Theta,$$

wenn $\nu \geq n_1$ und ebenso

$$\left| \frac{a_{\nu} - b_{\nu}}{x - b_{\nu}} \right| < \frac{\Theta + \beta_{\nu}}{l + \beta_{\nu}}.$$

Da aber $\frac{\Theta + \beta_{\nu}}{l + \beta_{\nu}} \leq \frac{\Theta + \beta}{l + \beta}$, wo β wieder die obere Grenze der β_{ν} ist, so wird auch

$$\left| \frac{a_{\nu} - b_{\nu}}{x - b_{\nu}} \right| < \frac{\Theta + \beta}{l + \beta}.$$

Wenn man nun mit Rücksicht auf den endlichen Werth von β und die Ungleichung $\Theta < l$ ein n_2 so bestimmt, dafs

$$\frac{\Theta + \beta}{l + \beta} < \varepsilon^{(\nu)} \quad (\nu \geq n_2),$$

so wird auch

$$\left| \frac{a_{\nu} - b_{\nu}}{x - b_{\nu}} \right| < \varepsilon^{(\nu)}$$

sein, wenn ν gröfser oder gleich ist der gröfseren der ganzen Zahlen n_1 und n_2 .

Nunmehr ist die Existenz der innerhalb \mathfrak{A}_1 monogenen analytischen Function $F_1(x)$ erwiesen, denn der Ausdruck

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} F_{\nu}(x)$$

definiert eine Function mit den geforderten Eigenschaften und jede andere geht durch Addition einer blofs an den Stellen von Q_1' irregulären Function hervor.

Umgekehrt läfst sich eine eindeutige Function $\overline{F}(x)$ mit den sin-

gulären Stellen a_1, a_2, \dots als Summe eines Ausdruckes $\sum_{v=1}^{\infty} F_v(x)$ und einer Function darstellen, die nur an den Stellen der aus der isolirten Punktmenge (a_1, a_2, \dots) abgeleiteten Menge Q' nicht regulären Verhaltens ist, denn nach dem Laurent'schen Satze kann man $\bar{F}(x)$ in der Umgebung von a_v in der Form

$$G_v\left(\frac{1}{x-a_v}\right) + \mathfrak{P}_v(x-a_v)$$

ausdrücken.

§ 56. Arithmetische Ausdrücke, die mehrere Functionen ganz oder theilweise darstellen.

Es soll nunmehr untersucht werden, ob ein und derselbe Ausdruck in verschiedenen Bereichen seiner gleichmäßigen Convergenz verschiedene Functionen vollständig oder nur theilweise darstellen kann, oder ob er in manchen Bereichen Functionen vollständig und in anderen nur theilweise darstellt.

Diese Frage ist von der oben angeregten verschieden, und wir werden hier nicht erfahren, ob die früher construirte Function $F(x)$ mit den singulären Stellen $(Q+Q')$ in den continuirlichen Bereichen, die man erhält, indem man die Menge $Q+Q'$ aus dem Bereiche der unbeschränkten Variablen ausschließt, lauter monogene Functionen darstellt, die über diese Bereiche nicht fortzusetzen sind. Wir werden uns aber mit der Antwort auf die erste Frage begnügen und es als wahrscheinlich hinstellen müssen, daß $F(x)$ nicht bloß monogene Functionen vollständig darstellen wird.

M. Tannery hat eine Reihe gebildet, die in der Umgebung jeder Stelle x , für welche $|x| \geq 1$ gleichmäßig convergirt und den Werth $+1$ oder -1 besitzt, je nachdem $|x| \leq 1$ ist.

Er geht von der Bemerkung aus, daß unter der Annahme einer unendlichen Reihe positiver ganzer Zahlen

$$n_0, n_1, n_2, \dots, n_v, \dots$$

mit der oberen Grenze ∞

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1+x^{n_v}}{1-x^{n_v}} = \pm 1$$

ist, je nachdem $|x| \leq 1$ ist. Setzt man dann

$$\frac{1+x^{n_v}}{1-x^{n_v}} = \frac{1+x^{n_0}}{1-x^{n_0}} + \sum_{\mu=1}^v \left\{ \frac{1+x^{n_\mu}}{1-x^{n_\mu}} - \frac{1+x^{n_{\mu-1}}}{1-x^{n_{\mu-1}}} \right\},$$

so ist

$$\begin{aligned}\psi(x) &= \frac{1+x^{n_0}}{1-x^{n_0}} + \sum_{\mu=1}^{\infty} \left\{ \frac{1+x^{n\mu}}{1-x^{n\mu}} - \frac{1+x^{n\mu-1}}{1-x^{n\mu-1}} \right\} \\ &= \frac{1+x^{n_0}}{1-x^{n_0}} + \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{2x^{n\mu-1}(x^{n\mu}-x^{n\mu-1}-1)}{(x^{n\mu}-1)(x^{n\mu-1}-1)}\end{aligned}$$

die verlangte Reihe. Bezeichnet hierauf x' eine rationale Function von x , so wird die Gesamtheit der Stellen x , für welche der absolute Betrag von x' gleich 1 ist, in dem Bereiche der Variablen Continua, in denen $|x'|$ kleiner ist als Eins, von continuirlichen Bereichen trennen, wo $|x'| > 1$. Dann aber ist $\psi(x') = \chi(x)$ die Summe unendlich vieler rationaler Functionen, die in den Bereichen, wo $|x'| \geq 1$ ist, den Werth ∓ 1 besitzt; aber dort, wo $|x'| = 1$ ist, convergirt $\chi(x)$ nicht.

Ist x' nur eine lineare Function von $x = \xi + i\eta$:

$$x' = \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta} = f(x),$$

wo die Coefficienten durch Division von $\sqrt{\alpha\delta - \beta\gamma}$ stets so umzuwandeln sind, daß $\alpha\delta - \beta\gamma = 1$ wird, so wird die Gleichung eines Kreises um die Stelle $m + in$ in der Form:

$$|x - (m + in)| = r$$

oder

$$A(\xi^2 + \eta^2) - 2mA\xi - 2nA\eta + (m^2 + n^2 - r^2)A = 0$$

oder in der Form zu schreiben sein:

$$Ax_0 + Bx + B_0x_0 + C = 0,$$

wenn x_0 und B_0 die conjugirten Werthe von x und B und A und C reelle Größen sind. Das aus diesem Kreise durch die Substitution

$$x' = f(x) \quad \text{und} \quad x'_0 = \frac{\alpha_0 x_0 + \beta_0}{\gamma_0 x_0 + \delta_0}$$

abzuleitende Gebilde:

$$\begin{aligned}A(\alpha x + \beta)(\alpha_0 x_0 + \beta_0) + B(\alpha x + \beta)(\gamma_0 x_0 + \delta_0) + B_0(\alpha_0 x_0 + \beta_0)(\gamma x + \delta) \\ + C(\gamma x + \delta)(\gamma_0 x_0 + \delta_0) = 0\end{aligned}$$

oder

$$\begin{aligned}xx_0(A\alpha\alpha_0 + B\alpha\gamma_0 + B_0\alpha_0\gamma + C\gamma\gamma_0) \\ + x(A\alpha\beta_0 + B\alpha\delta_0 + B_0\alpha_0\delta + C\gamma\delta_0) \\ + x_0(A\alpha_0\beta + B\beta\gamma_0 + B_0\beta_0\gamma + C\gamma_0\delta) \\ + (A\beta\beta_0 + B\beta\delta_0 + B_0\beta_0\delta + C\delta\delta_0) = 0,\end{aligned}$$

wo $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0, \delta_0$ die $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ conjugirten Größen sind, ist offenbar wieder ein Kreis.

Wir theilen die Variabelnebene nun durch beliebige Kreise

$$|x - a_1| = r_1, \quad |x - a_2| = r_2, \dots, |x - a_n| = r_n,$$

von denen niemals zwei einen Bereich gemein haben, in $n+1$ Theile und bestimmen n Functionen.

$$x_\nu = \frac{\alpha_\nu x + \beta_\nu}{\gamma_\nu x + \delta_\nu},$$

so daß $|x_\nu|$ auf dem Kreise $|x - a_\nu| = r_\nu$ gleich Eins ist. Dann hat $|x_\nu|$ innerhalb des Kreises stets einen Werth ≥ 1 und außerhalb desselben einen Werth, der ≤ 1 ist.

Ist z. B. $|x_\nu|$ ($\nu = 1, 2, \dots, n$) in dem Bereiche $|x - a_\nu| < r_\nu$ kleiner als Eins und sind

$$F_0(x), F_1(x), \dots, F_n(x)$$

eindeutige Functionen, deren Stetigkeitsbereich bloß durch eine unendliche Anzahl außerwesentlich und eine endliche Anzahl wesentlich singulärer Stellen begrenzt ist, auf daß sie in einem unendlichen Bereiche regulär sind, so hat der Ausdruck

$$F_0(x) + \frac{1}{2} \sum_{\nu=1}^n (1 + \psi(x_\nu)) (F_\nu(x) - F_0(x))$$

die Eigenschaft, die Function $F_\nu(x)$ so lange darzustellen, als x innerhalb des Kreises r_ν liegt, und $F_\mu(x)$ darzustellen, so lange x in dem Kreise r_μ sich befindet, d. h. derselbe Ausdruck stellt in verschiedenen Theilen seines Convergencebereiches verschiedene Functionen nur theilweise dar. Sollten aber die Functionen $F_1(x), \dots, F_n(x)$ nur innerhalb der Kreise r_1, \dots, r_n , und sollte $F_0(x)$ außerhalb aller Kreise allein existiren, so stellt derselbe Ausdruck verschiedene Functionen vollständig dar.

Sind andererseits die n Kreise so gewählt, daß jeder von dem folgenden umschlossen wird, wobei der Bereich der Variablen x wieder in $n+1$ Theile gesondert ist, so wird der Ausdruck

$$\frac{1}{2} (F_{n+1}(x) + F_1(x)) - \frac{1}{2} \sum_{\nu=1}^n (F_{n+1}(x) - F_\nu(x)) \psi(x_\nu)$$

in dem ersten Kreise $F_1(x)$, in dem daran grenzenden ringförmigen Gebiete $F_2(x)$ usw., endlich außerhalb des letzten Kreises $F_{n+1}(x)$ darstellen. Wenn die Functionen $F_1(x), \dots, F_{n+1}(x)$ nur eine endliche Anzahl wesentlich singulärer Stellen besitzen, stellt der genannte Ausdruck in den einzelnen Bereichen Theile verschiedener Functionen dar, wenn aber $F_1(x)$ innerhalb des ersten, $F_2(x)$ innerhalb des zweiten usw., $F_{n+1}(x)$ innerhalb des letzten Bereiches allein existirt, repräsentirt derselbe Ausdruck mehrere Functionen vollständig, und wenn endlich $F_1(x)$ innerhalb des ersten Kreises, $F_2(x)$ in dem zweiten Kreise und $F_{n+1}(x)$ innerhalb der ganzen Ebene existirt, so bringt unser Ausdruck eine Function, nämlich $F_1(x)$, vollständig und die übrigen nur theilweise zur Darstellung.

Wir sehen also an diesen einfachen Beispielen, daß alle der früher genannten Fälle vorkommen.

Das Wesentliche dieser Erörterungen besteht aber in der Erkenntnis, daß *der Begriff der monogenen Function mit dem Begriff einer durch Größenoperationen ausdrückbaren Abhängigkeit nicht vollkommen zusammenfällt.**) Und wenn man zwei Functionen als identisch erkennt, die in der Umgebung einer Stelle x_0 für unendlich viele Werthe mit der Häufungsstelle x_0 übereinstimmen, so ist die Identität zweier Ausdrücke, deren Bereich gleichmäßiger Convergenz aus verschiedenen Continuis besteht, erst dann erwiesen, wenn man die Identität der verschiedenen Functionen, welche sie darstellen, erkannt hat.

§ 57. Darstellung eindeutiger Functionen durch Producte.

Es ist schon früher geglückt, nicht allein die ganze, sondern auch die eindeutige Function mit einer wesentlichen und unendlich vielen außerwesentlich singulären Stellen durch den Quotienten unendlicher Producte von Primfunctionen darzustellen.

Die Darstellung einer eindeutigen Function durch unendliche Producte soll nunmehr verallgemeinert werden.

Zu diesem Zwecke nehmen wir eine isolirte unendliche Punktmenge Q an, die mit Q' vereinigt ein Continuum \mathfrak{A} vollständig begrenzt, ordnen den Stellen von Q

$$a_1, a_2, \dots a_r, \dots$$

positive oder negative ganze Zahlen

$$n_1, n_2, \dots n_r, \dots$$

zu und beweisen zunächst, daß es stets eine monogene eindeutige Function $F(x)$ gibt, die in der Umgebung jeder Stelle von \mathfrak{A} regulären Verhaltens ist, an den Stellen a_r von der n_r ten Ordnung Null oder unendlich wird, je nachdem n_r positiv oder negativ ist und in der Umgebung jeder solchen Stelle auf die Form

$$(x - a_r)^{n_r} e^{\mathfrak{P}_r(x - a_r)}$$

gebracht werden kann, womit gesagt ist, daß sie daselbst außer an der Stelle a_r weder verschwindet noch unendlich wird. Die Stellen der Punktmenge Q' sind wesentlich singuläre Stellen von $F(x)$. Umgekehrt wird aber jede Function dieser Eigenschaften in derselben Weise auszudrücken sein wie $F(x)$. —

Man ordne jeder Stelle a_r wieder eine auf der Begrenzung von $\mathfrak{A} + Q$ oder außerhalb dieses Bereiches liegende Stelle b_r in der früheren Weise zu und wähle eine Reihe positiver Größen

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots \varepsilon_r, \dots$$

von endlicher Summe und eine weitere Reihe positiver Größen

*) Siehe Weierstrass, Functionenlehre p. 79 u. s. f.

$$\varepsilon^{(1)}, \varepsilon^{(2)}, \dots, \varepsilon^{(r)}$$

mit der Grenze 1, bilde endlich die Primfunctionen:

$$E_v(x) = \left(1 - \frac{a_v - b_v}{x - b_v}\right)^{n_v} e^{\sum_{\mu=1}^{m_v} \frac{1}{\mu} \left(\frac{a_v - b_v}{x - b_v}\right)^\mu},$$

so wird bei passender, mit den Gröfßen ε_v und $\varepsilon^{(v)}$ zusammenhängender

Wahl der positiven ganzen Zahlen m_v das Product $\prod_{v=1}^{\infty} E_v(x)$ die verlangte Function $F(x)$ definiren.

Ist a_v von Null und Unendlich verschieden, so läßt sich die genannte Primfunction in dem Bereiche

$$\left| \frac{a_v - b_v}{x - b_v} \right| < 1$$

— an dessen Stelle im Falle $b_v = \infty$ der Bereich $\left| \frac{x}{a_v} \right| < 1$ tritt — auf die Form

$$e^{-n_v \sum_{\mu=m_v+1}^{\infty} \frac{1}{\mu} \left(\frac{a_v - b_v}{x - b_v}\right)^\mu}$$

bringen. Hier wähle man die ganze Zahl m_v derart, daß

$$\left| n_v \sum_{\mu=m_v+1}^{\infty} \frac{1}{\mu} \left(\frac{a_v - b_v}{x - b_v}\right)^\mu \right|$$

in dem Bereiche $\left| \frac{a_v - b_v}{x - b_v} \right| \leq \varepsilon^{(v)}$ kleiner wird als ε_v . Da sich hierauf eine ganze Zahl n so angeben läßt, daß der absolute Betrag von $\frac{a_v - b_v}{x - b_v}$ für alle durch eine Bedingung $|x - x_0| \leq \rho$ definirten Stellen des Continuum \mathfrak{A} kleiner wird als $\varepsilon^{(v)}$, wofern $v \geq n$ ist, so kann man auch eine ganze Zahl n' der Beschaffenheit finden, daß nach Annahme einer Gröfße δ für alle die genannten Stellen der Umgebung von x_0

$$\sum_{v=n}^{\infty} \left| n_v \sum_{\mu=m_v+1}^{\infty} \frac{1}{\mu} \left(\frac{a_v - b_v}{x - b_v}\right)^\mu \right| < \delta,$$

sobald $x \geq n$ ist. Dann aber wird auch das Product

$$\prod_{v=1}^{\infty} E_v(x) = \prod_{v=1}^{n-1} E_v(x) \prod_{v=n}^{\infty} E_v(x)$$

gleichzeitig convergiren und in der Umgebung jeder dem Continuum \mathfrak{A} angehörigen Stelle x_0 durch eine Potenzreihe $\mathfrak{P}_0(x - x_0)$ darzustellen sein. Weil das Product in eben diesem Bereiche weder Null noch unendlich wird, kann man der letzten Reihe auch die Gestalt

$$e^{\mathfrak{B}(x - x_0)}$$

geben.

In der Umgebung einer der Menge Q angehörigen Stelle a_1 ist ein Bereich angebar, in dem der Quotient

$$\frac{\prod_{v=1}^{\infty} E_v(x)}{E_1(x)}$$

regulären Verhaltens ist und nicht verschwindet, und darum läßt sich das Product daselbst in der Form

$$(x - a_1)^{n_1} e^{g_1(x-a_1)}$$

ausdrücken.

Die Stellen a_1 sind also Null oder außerwesentlich singuläre Stellen der durch das Product definirten analytischen Function und die in Q' enthaltenen Häufungsstellen sind offenbar wesentlich singuläre Stellen.

Das Product von $\prod_{v=1}^{\infty} E_v(x)$ und einer nur an den Stellen Q' irregulären und innerhalb des Bereiches $\mathfrak{A} + Q$ nicht verschwindenden Function $F_0(x)$ genießt dieselben Eigenschaften. Bezeichnet man eine eindeutige monogene Function, die im Innern des Continuum $\mathfrak{A} + Q$ regulär ist, mit $f_0(x)$, so hat $F_0(x)$ die Gestalt $e^{f_0(x)}$ und jede Function der ursprünglich genannten Art ist in einem Ausdrucke

$$\prod_{v=1}^{\infty} E_v(x) \cdot e^{f_0(x)}$$

enthalten.

Heißen die Stellen von Q , denen positive Zahlen n_v zugehören, a_v , diejenigen, welchen negative zugeordnet sind, α_v , so kann man

$$\prod_{v=1}^{\infty} E_v(x) = \frac{\prod_{v=1}^{\infty} E_v(x, a_v)}{\prod_{v=1}^{\infty} \bar{E}_v(x, \alpha_v)}$$

setzen, wenn unter $E_v(x, a_v)$ und $\bar{E}_v(x, \alpha_v)$ die Primfunctionen mit den Nullstellen a_v resp. α_v verstanden sind.

Ordnet man diesen Stellen a_v und α_v nur Punkte der Menge Q' zu, in welchem Falle man die früheren Größen $\varepsilon^{(v)}$ auf eine einzige ε reduciren kann, die kleiner als 1 ist, und heißen diese Punkte b_v oder β_v , so wird

$$\prod_{v=1}^{\infty} E_v(x) = \frac{\prod_{v=1}^{\infty} \left(1 - \frac{a_v - b_v}{x - b_v}\right)^{n_v} e^{\sum_{\mu=1}^{m_v} \frac{1}{\mu} \left(\frac{a_v - b_v}{x - b_v}\right)^{\mu}}}{\prod_{v=1}^{\infty} \left(1 - \frac{\alpha_v - \beta_v}{x - \beta_v}\right)^{n_v} e^{\sum_{\mu=1}^{m_v} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\alpha_v - \beta_v}{x - \beta_v}\right)^{\mu}}},$$

doch weil man einer endlichen oder unendlichen Anzahl von Stellen dieselben wesentlich singuläre Stellen der Bedingung $\lim |a_v - b_v| = 0$ oder $\lim |\alpha_v - \beta_v| = 0$ gemäß zuordnen kann, erhält das Product auch die Gestalt:

$$e^{f_0(x)} \frac{\prod_{v=1}^{\infty} G_v\left(\frac{1}{x-b_v}\right)}{\prod_{v=1}^{\infty} \bar{G}_v\left(\frac{1}{x-\beta_v}\right)},$$

wo G_v und \bar{G}_v ganze Functionen ihrer Argumente bezeichnen.

Dafür endlich kann man noch die weitere Form

$$e^{g_0(x)} \frac{\prod G_v\left(\frac{1}{x-b_v}\right)}{\prod \bar{G}_v\left(\frac{1}{x-b_v}\right)}$$

ansetzen, wenn man die denselben singulären Stellen b_v zuzuordnenden Null- und Unendlichkeitsstellen a_v und α_v zusammenfaßt. Gehört einer besonderen Stelle b_λ keine Null- oder Unendlichkeitsstelle zu, so wird für diese $G_v\left(\frac{1}{x-b_\lambda}\right)$ beziehungsweise $\bar{G}_v\left(\frac{1}{x-b_v}\right)$ durch die Einheit zu ersetzen sein.

Damit ist eine Darstellung einer eindeutigen monogenen Function mit unendlich vielen wesentlich singulären Stellen gewonnen, deren Form der Darstellung einer Function mit einer wesentlich singulären Stelle analog ist. Aber ebenso läßt sich jede monogene eindeutige Function mit vorgegebenen Null- und außerwesentlichen Unendlichkeitsstellen ausdrücken, denn wenn eine solche Function auf die genannte Art bestimmt ist, so wird der Quotient der gegebenen und dieser Function eine innerhalb $\mathfrak{A} + Q$ reguläre Function $e^{f_0(x)}$. —

Es ist nun auch ersichtlich, daß wir für diese Functionen bezüglich ihrer Beschaffenheit in der Umgebung wesentlich singulärer Stellen dieselben Untersuchungen anstellen können, wie über die Function mit einer einzigen wesentlichen Singularität. Zunächst wird eine Function $F(x)$ außerhalb eines dem Bereiche $\mathfrak{A} + Q$ entnommenen Theilbereiches \mathfrak{B} dem absoluten Betrage nach gewiß größer als irgend eine vorgegebene GröÙe R , und $F(x)$ muß in unendlich kleiner Umgebung der wesentlich singulären Stellen einen unendlich großen Werth annehmen. Dann kommt ihr Werth daselbst jeder GröÙe beliebig nahe, da $\frac{1}{F(x) - A}$ dieselben wesentlich singulären Stellen besitzt wie $F(x)$ selbst.

Die eindeutige Function wird aber auch jedem Werthe A außerhalb eines Bereiches \mathfrak{B} beliebig nahe kommen, und dann gibt es in beliebiger Nähe von A einen Werth A_1 , den sie außerhalb \mathfrak{B} wirklich erreicht, z. B. für $x = x_1$.

Einen in der Nähe von A und A_1 liegenden Werth A_2 erhält $F(x)$ dann für einen in der Umgebung von x_1 liegenden Werth x_2 . Aber ferner gibt es außerhalb dieser Umgebung Stellen x_2' , für welche $F(x)$ beliebig nahe an A_2 herankommt und etwa gleich A_3 wird. Diesen Werth nimmt $F(x)$ also an zwei Stellen x_2' und x_2'' an, wobei x_2'' in der Umgebung von x_1 und x_2 liegt.

Hat man so fortschreitend einen in beliebiger Nähe von A liegenden Werth A_n gefunden, den die Function $F(x)$ für $(n-1)$ Werthe

$$x_n^{(1)}, x_n^{(2)}, \dots x_n^{(n-1)}$$

ihres Stetigkeitsbereiches annimmt, so kann man auch einen A_{n+1} benachbarten Werth A_{n+1} angeben, den $F(x)$ für n Werthe

$$x_{n+1}^{(1)}, x_{n+1}^{(2)}, \dots x_{n+1}^{(n)}$$

erhält, von denen $(n-1)$ in der Nähe der Stellen $x_n^{(\nu)}$ ($\nu = 1, 2, \dots, n$) liegen, indess der n^{te} außerhalb dieser Bereiche liegt.

Fixirt man also einen Werth A , dem $F(x)$ beliebig nahe kommt, so kann man in beliebig kleiner Umgebung von A Werthe angeben, die $F(x)$ an beliebig vielen Stellen ihres Stetigkeitsbereiches annimmt.*)

Mit diesem Satze brechen wir die Untersuchungen über die allgemeinen eindeutigen analytischen Functionen ab und verweisen im Übrigen auf die schon citirten Originalabhandlungen.

*) Siehe Phragmen, Acta mathem. Bd. 7, p. 40.

Siebentes Capitel.

I. Abschnitt.

Doppeltperiodische Functionen.

§ 58. Allgemeine Eigenschaften der doppeltperiodischen Functionen, die im Endlichen den Charakter rationaler Functionen besitzen.*)

Wir wenden uns wieder zu der Aufgabe, analytische Functionen zu ermitteln, welche besondere Eigenschaften genießen.

Eine analytische Function $f(x)$ heißt *periodisch*, wenn bei beliebigem Werthe ihres Argumentes für gewisse constante Gren w die Gleichung

$$f(x + w) = f(x)$$

besteht. Jede solche Constante w nannten wir eine Periode und jedes ganzzahlige Vielfache derselben ist wieder eine Periode.

Man kann zunächst zeigen, daß eine eindeutige oder endlich vieldeutige analytische Function $f(x)$ keine unendlich kleine Perioden besitzen könne.

Andernfalls hätte nämlich $f(x)$ in der Umgebung einer regulären Stelle x_0 , wo die Darstellung

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0) \frac{x - x_0}{1!} + f''(x_0) \cdot \frac{(x - x_0)^2}{2!} + \dots$$

gilt, unendlich oft den Werth $f(x_0)$ oder es gäbe in jeder Nähe von x_0 unendlich viele Stellen, an denen

$$f'(x_0) \frac{x - x_0}{1} + f''(x_0) \frac{(x - x_0)^2}{2!} + \dots$$

verschwände und das ist mit der nothwendigen Voraussetzung, daß $f(x) - f(x_0)$ nicht identisch Null ist, unvereinbar.

Es gibt daher in einem endlichen Bereiche nur eine endliche Anzahl von Stellen $x + w$, an denen $f(x + w) = f(x)$ ist oder nur eine endliche Anzahl von Perioden, deren absoluter Betrag eine endliche Grenze nicht überschreitet.

*) Vergleiche die Formeln und Lehrsätze von Schwarz und Kiepert's schon genannte Abhandlung.

Unter den Stellen $x = |x|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$, wo φ constant ist, sei

$$2\varpi = |2\varpi|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$$

diejenige Periode mit dem kleinsten absoluten Betrage, dann sind alle übrigen derselben Form

$$2\omega = |2\omega| \cos \varphi + i \sin \varphi$$

ganzahlige Vielfache von 2ϖ : $2\omega = 2n\varpi$. Wäre auch $2m\varpi$ eine Periode, wenn m keine ganze Zahl bedeutet, so müßte nach der Zerlegung $m = n + \nu$ $|\nu| < 1$ zugleich mit $2m\varpi = 2n\varpi + 2\nu\varpi$ auch $2\nu\varpi$ eine Periode sein und deren absoluter Betrag wäre kleiner als $|2\varpi|$.

Gibt es außer den Stellen

$$2n\varpi \quad (n = \pm 1, \pm 2, \dots)$$

keine weiteren Perioden, so ist die Function *einfach periodisch*. Existiren aber noch andere Perioden $2n\varpi'$, so kann das Verhältniß $\frac{\varpi'}{\varpi}$ vor Allem nicht reell sein, sonst wäre ja mit

$$2n\varpi' = 2n_1\varpi + 2\nu_1\varpi,$$

wo n_1 wieder eine ganze Zahl und $|\nu_1| < 1$ ist, auch $2\nu_1\varpi$ eine Periode.

Bezeichnen $2\omega^{(1)}$ und $2\omega^{(2)}$ Perioden von nicht reellem Verhältniß, so sind alle übrigen in der Formel

$$2\xi_1\omega^{(1)} + 2\xi_2\omega^{(2)}$$

enthalten, wo ξ_1 und ξ_2 reelle Größen bedeuten.

Unter der Voraussetzung einer blos endlichen Anzahl von *Periodenpunkten* in einem endlichen Bereiche kann man zeigen, daß es ein Periodenpaar ($2\omega^{(1)}, 2\omega^{(2)}$) gibt, aus dem alle übrigen ganzzahlig zusammensetzen sind.*)

Wählt man nämlich eine Periode, in welcher $\xi_2 = 0$ ist und ξ_1 den kleinsten in dem Intervalle:

$$0 < \xi_1 \leq 1$$

befindlichen Werth annimmt, und dann eine zweite, wo ξ_1 und ξ_2 die kleinsten innerhalb der reellen Bereiche

$$0 \leq \xi_1 \leq 1, \quad 0 < \xi_2 \leq 1$$

liegenden Werthe besitzen und nennt diese unter unserer Voraussetzung jedenfalls existirenden Perioden von nicht reellem Verhältniß:

$$2\omega^{(1)} = 2\xi_1^{(1)}\omega^{(1)}, \quad 2\omega^{(2)} = 2\xi_1^{(2)}\omega^{(1)} + 2\xi_2^{(2)}\omega^{(2)},$$

so erhält jede Periode $2\xi_1\omega^{(1)} + 2\xi_2\omega^{(2)}$ die Form

$$2\nu_1\omega^{(1)} + 2\nu_2\omega^{(2)} + 2\eta_1\omega^{(1)} + 2\eta_2\omega^{(2)},$$

wo η_1 und η_2 die Bedingungen

*) Siehe Weierstrass, Monatsberichte der Berliner Akad. 1876.

$$0 \leq \eta_1 < \xi_1^{(1)}, \quad 0 \leq \eta_2 < \xi_2^{(2)}$$

erfüllen und ν_1 und ν_2 ganze Zahlen werden, denn man kann

$$\xi_1 = \nu_1 \xi_1^{(1)} + \nu_2 \xi_1^{(2)} + \eta_1, \quad \xi_2 = \nu_2 \xi_2^{(2)} + \eta_2$$

setzen. Nun muß aber

$$2\eta_1 \omega^{(1)} + 2\eta_2 \omega^{(2)}$$

eine Periode sein, und weil das zufolge der Festsetzungen über die Beschaffenheit von $2\omega^{(1)}$ und $2\omega^{(2)}$ nur angeht, wenn η_2 und η_1 verschwinden, so haben wir in $2\omega^{(1)}$ und $2\omega^{(2)}$ wirklich Perioden, durch die jede andere ganzzahlig auszudrücken ist:

$$2\xi_1 \omega^{(1)} + 2\xi_2 \omega^{(2)} = 2\nu_1 \omega^{(1)} + 2\nu_2 \omega^{(2)}$$

und wir wissen von früher her, daß es in einem endlichen Bereiche nur eine endliche Anzahl von Stellen solcher Art geben kann. —

Bilden wir aus drei Perioden $2\omega_1, 2\omega_2, 2\omega_3$, von denen keine zwei in reellem Verhältniß stehen dürfen, damit keine unendlich kleine Perioden existiren, die Perioden:

$$2\xi_1 \omega_1 + 2\xi_2 \omega_2 + 2\xi_3 \omega_3,$$

wo ξ_1, ξ_2, ξ_3 wieder reell sind und setzen voraus, daß in einem endlichen Bereiche nur eine endliche Anzahl von Periodenstellen liegt, so kann man unter den Perioden ein System

$$2\bar{\omega}_1 = 2\xi_1^{(1)} \omega_1, \quad 2\bar{\omega}_2 = 2\xi_1^{(2)} \omega_1 + 2\xi_2^{(2)} \omega_2, \quad 2\bar{\omega}_3 = 2\xi_1^{(3)} \omega_1 + 2\xi_2^{(3)} \omega_2 + 2\xi_3^{(3)} \omega_3$$

ausfindig machen, wo die Coefficienten $\xi^{(k)}$ ($k = 1, 2, 3$) die kleinsten der an die Bedingungen

$$0 < \xi_1 \leq 1, \quad \xi_2 = 0, \quad \xi_3 = 0$$

oder

$$0 \leq \xi_1 \leq 1, \quad 0 < \xi_2 \leq 1, \quad \xi_3 = 0$$

oder

$$0 \leq \xi_1 \leq 1, \quad 0 \leq \xi_2 \leq 1, \quad 0 < \xi_3 \leq 1$$

gebundenen Werthe von ξ_1, ξ_2, ξ_3 sind, die bei Perioden vorkommen.

Zerlegt man dann ξ_1, ξ_2, ξ_3 in $2\xi_1 \omega_1 + 2\xi_2 \omega_2 + 2\xi_3 \omega_3$:

$$\xi_3 = \nu_3 \xi_3^{(3)} + \eta_3$$

$$\xi_2 = \nu_2 \xi_2^{(2)} + \nu_3 \xi_2^{(3)} + \eta_2$$

$$\xi_1 = \nu_1 \xi_1^{(1)} + \nu_2 \xi_1^{(2)} + \nu_3 \xi_1^{(3)} + \eta_1$$

und läßt ν_1, ν_2, ν_3 ganze Zahlen sein, knüpft aber η_1, η_2, η_3 an die Ungleichungen

$$0 \leq \eta_1 < \xi_1^{(1)}, \quad 0 \leq \eta_2 < \xi_2^{(2)}, \quad 0 \leq \eta_3 < \xi_3^{(3)},$$

so erhält die aus $2\omega_1, 2\omega_2, 2\omega_3$ bestehende Periode die Form

$$2\nu_1 \bar{\omega}_1 + 2\nu_2 \bar{\omega}_2 + 2\nu_3 \bar{\omega}_3,$$

denn

$$2\eta_1 \omega_1 + 2\eta_2 \omega_2 + 2\eta_3 \omega_3$$

kann keine Periode sein.

Setzt man jetzt

$$2\bar{\omega}_k = \alpha_k + i\beta_k \quad (k = 1, 2, 3),$$

so lassen sich unter der Voraussetzung, daß zwischen den Perioden $2\bar{\omega}_k$ keine ganzzahlige homogene lineare Gleichung besteht:

$$2\mu_1\bar{\omega}_1 + 2\mu_2\bar{\omega}_2 + 2\mu_3\bar{\omega}_3 = 0,$$

in welchem Falle eine der Perioden linear von den zwei übrigen abhinge und durch zwei neue Perioden ganzzahlig auszudrücken wäre, unendlich viele ganze Zahlen ν_1, ν_2, ν_3 finden, für die

$$|\nu_1\alpha_1 + \nu_2\alpha_2 + \nu_3\alpha_3| \text{ und } |\nu_1\beta_1 + \nu_2\beta_2 + \nu_3\beta_3|$$

unendlich klein wird*), d. h. es gibt unendlich kleine Perioden. Doch weil solche bei der eindeutigen (oder auch endlich vieldeutigen) analytischen Function nicht vorkommen können, gibt es keine dreifach (und ebensowenig mehrfach) periodische eindeutige Functionen.

Ein Periodenpaar der *doppeltperiodischen Function*, durch welches alle Perioden ganzzahlig in der Form

$$w = 2\mu\omega + 2\mu'\omega'$$

auszudrücken sind, heist ein *primitives*, doch es gibt — wie wir wissen — unendlich viele dem Paare $(2\omega, 2\omega')$ *äquivalente Periodenpaare* $(2\varpi, 2\varpi')$, durch welche man dieselbe Gesamtheit von Stellen w ganzzahlig ausdrücken kann. Dazu muß nur

$$2\varpi = 2p\omega + 2q\omega', \quad 2\varpi' = 2p'\omega + 2q'\omega'$$

sein und die ganzen Zahlen p, q, p', q' haben die Bedingung

$$pq' - p'q = \pm 1$$

zu erfüllen.

Der nothwendig von Null verschiedene reelle Bestandtheil des Verhältnisses $\frac{\varpi'}{\varpi i}$ besitzt dasselbe Zeichen wie

$$(pq' - p'q) \Re\left(\frac{\omega'}{\omega i}\right),$$

daher können wir, ohne die Allgemeinheit zu beeinträchtigen, den weiteren Untersuchungen ein primitives Periodenpaar zu Grunde legen, bei welchem

$$\Re\left(\frac{\omega'}{\omega i}\right)$$

positiv ist.

Man nennt zwei Werthe des Argumentes *congruent* oder *äquivalent*, wenn ihre Differenz $(x - x_0)$ eine Periode ist. Indem man aber die Differenz

$$x - x_0 = 2\xi\omega + 2\xi'\omega'$$

setzen kann, wo ξ und ξ' reell sind, und ferner

$$x - x_0 = 2\mu\omega + 2\mu'\omega' + 2t\omega + 2t'\omega'$$

*) Siehe z. B. Koenigsberger: Elliptische Functionen 1. Bd. p. 363–367.

gilt, wenn μ und μ' ganze Zahlen sind und t und t' reelle Werthe zwischen Null und Eins (0 ein- und 1 ausgeschlossen) bedeuten, so erscheint jede Stelle x einem Werthe aus der Gesamtheit von Stellen, die durch

$$x_0 + 2t\omega + 2t'\omega', \quad 0 \leq t < 1, \quad 0 \leq t' < 1$$

definiert sind, congruent.

Man nennt diese Gesamtheit von Stellen in dem Bereiche der Variablen ein *Periodenparallelogramm*.

Die eindeutige Function $f(x)$ mit den primitiven Perioden 2ω und $2\omega'$ nimmt offenbar jeden Werth, den sie überhaupt annimmt, in jedem Periodenparallelogramm an und weil sie unendlich werden muß, besitzt sie gewiß unendlich viele Unendlichkeitsstellen und kann keinesfalls eine ganze Function sein. Da die Function $\frac{1}{f(x) - A}$ denselben Charakter hat wie $f(x)$, muß $f(x)$ in dem Periodenparallelogramm jeden Werth annehmen und an jeder der Stelle x_0 congruenten Stelle $x_0 + \omega$ wird sie den Werth $f(x_0)$ in der gleichen Vielheit besitzen wie in x_0 , denn es ist

$$f(x_0 + \omega + h) = f(x_0 + h)$$

und die Function $f(x)$ hat in der Umgebung von x_0 und $x_0 + \omega$ eine gleichartige Entwicklung.

Sind die singulären Stellen in dem Periodenparallelogramm nur außerwesentlich singulär, so hat $f(x)$ die einzige wesentlich singuläre Stelle ∞ und ist durch den Quotienten ganzer Functionen $G_1(x)$ und $G_2(x)$ darstellbar. —

Wir wollen uns nur mit solchen eindeutigen doppeltperiodischen Functionen beschäftigen, die sich im Endlichen durchaus wie eine rationale Function verhalten und somit einen und denselben Werth nur an einer endlichen Anzahl von Stellen des Periodenparallelogrammes annehmen können.

Es handelt sich zunächst um die Aufstellung ihrer Ausdrücke. Nennt man noch *Grad* der doppeltperiodischen Function die ganze Zahl, welche die Anzahl der Unendlichkeitsstellen im Periodenparallelogramm, jede in der zugehörigen Ordnungszahl gezählt, angibt, so soll eine solche Function m^{ten} Grades mit den Unendlichkeitsstellen

$$u_\mu + \omega \quad (\mu = 1, 2 \dots m)$$

und den Nullstellen $v_\nu + \omega$ ($\nu = 1, 2 \dots n$) construirt werden.

Bezeichnet $g(u)$ eine ganze Function, so muß jede eindeutige Function der verlangten Art in dem Ausdrücke

$$\varphi(u) = \frac{\sigma(u - u_1) \sigma(u - u_2) \dots \sigma(u - u_m)}{\sigma(u - v_1) \sigma(u - v_2) \dots \sigma(u - v_n)} e^{g(u)}$$

enthalten sein — wo $\sigma(u)$ die in dem vorigen Capitel aufgestellte ganze Function mit den Nullstellen $2\mu\omega + 2\mu'\omega'$ bedeutet —, aber damit $\varphi(u)$ die primitiven Perioden 2ω und $2\omega'$ besitze, oder die Gleichungen

$$\varphi(u + 2\omega) = \varphi(u) \quad \text{und} \quad \varphi(u + 2\omega') = \varphi(u)$$

gelten, müssen noch eine Reihe von Beziehungen bestehen, die mit Hilfe der bekannten Gleichungen:

$$\sigma(u - u_0 + 2\omega) = -e^{2\eta(u-u_0+\omega)} \sigma(u - u_0), \quad \eta = \frac{\sigma'(\omega)}{\sigma(\omega)}$$

$$\sigma(u - u_0 + 2\omega') = -e^{2\eta'(u-u_0+\omega')} \sigma(u - u_0), \quad \eta' = \frac{\sigma'(\omega')}{\sigma(\omega')}$$

leicht zu finden sind. Es ist:

$$\varphi(u + 2\omega) = \varphi(u) (-1)^{m-n} e^{2\eta(u+\omega)(m-n) - 2\eta\left(\sum_{\mu=1}^m u_\mu - \sum_{\nu=1}^n v_\nu\right) + g(u+2\omega) - g(u)}$$

$$\varphi(u + 2\omega') = \varphi(u) (-1)^{m-n} e^{2\eta'(u+\omega')(m-n) - 2\eta'\left(\sum_{\mu=1}^m u_\mu - \sum_{\nu=1}^n v_\nu\right) + g(u+2\omega') - g(u)}$$

und daher muß man

$$m - n \equiv 0 \pmod{2}$$

$$g(u + 2\omega) - g(u) = -2\eta\left[(u + \omega)(m - n) - \sum_{\mu} u_\mu + \sum_{\nu} v_\nu\right] + 2k\pi i$$

$$g(u + 2\omega') - g(u) = -2\eta'\left[(u + \omega')(m - n) - \sum_{\mu} u_\mu + \sum_{\nu} v_\nu\right] + 2k'\pi i$$

setzen, wo k und k' ganze Zahlen bezeichnen. Differentiirt man die letzten Gleichungen zweimal, so erhält man die Gleichungen

$$g''(u + 2\omega) = g''(u), \quad g''(u + 2\omega') = g''(u),$$

aus denen zu schliessen ist, daß die ganze Function $g''(x)$ nicht von u abhängt oder eine Constante ist, denn sie kann als ganze Function von u nicht doppeltperiodisch sein. Setzt man daher

$$g''(u) = \frac{d^2 g(u)}{du^2} = C,$$

so wird $g(u)$ von der Form:

$$g(u) = Au^2 + Bu + C$$

und

$$g(u + 2\omega) - g(u) = 2A(u + \omega)2\omega + B2\omega$$

$$g(u + 2\omega') - g(u) = 2A(u + \omega')2\omega' + B2\omega'.$$

Durch den Vergleich dieser Ausdrücke mit den früheren erhält man zunächst die Gleichungen:

$$2A\omega + (m - n)\eta = 0, \quad 2A\omega' + (m - n)\eta' = 0,$$

deren Determinante

$$2(\omega\eta' - \omega'\eta) = \mp \pi i$$

ist, je nachdem $\Re\left(\frac{\omega'}{\omega i}\right) \geq 0$. Weil die Determinante nicht verschwindet, sind die Lösungen der Gleichungen

$$A = 0 \quad \text{und} \quad m - n = 0;$$

d. h. die eindeutige doppeltperiodische Function, die im Endlichen den Charakter einer rationalen Function besitzt, wird in jedem Periodenparallelogramm eben so oft Null als unendlich und hat daselbst jeden Werth in derjenigen Anzahl, welche der Grad anzeigt.

Da auch die Gleichungen

$$B\omega - \eta \sum_{\mu=1}^m (u_\mu - v_\mu) = k\pi i$$

$$B\omega' - \eta' \sum_{\mu=1}^m (u_\mu - v_\mu) = k'\pi i$$

bestehen, findet man bei positivem $\Re\left(\frac{\omega'}{\omega i}\right)$

$$B = 2k\eta' - 2k'\eta = 2\bar{\eta} = 2 \frac{\sigma'(k\omega' - k'\omega)}{\sigma(k\omega' - k'\omega)} = 2 \frac{\sigma'(\varpi)}{\sigma(\varpi)}$$

$$\sum_{\mu=1}^m (u_\mu - v_\mu) = 2k\omega' - 2k'\omega = 2\varpi.$$

Setzt man endlich $e^c = c$, so erhält der allgemeinste Ausdruck einer eindeutigen doppeltperiodischen Function m^{ten} Grades die Form

$$\varphi(u) = c \prod_{\mu=1}^m \frac{\sigma(u - u_\mu)}{\sigma(u - v_\mu)} e^{2\bar{\eta} u}$$

und zwar ist die Summe der incongruenten Nullstellen $\sum_{\mu=1}^m u_\mu$ der Summe

der Unendlichkeitsstellen $\sum_{\mu=1}^m v_\mu$ congruent:

$$\sum_{\mu=1}^m u_\mu = \sum_{\mu=1}^m v_\mu + 2\mu\omega + 2\mu'\omega' = \sum_{\mu=1}^m v_\mu + 2\varpi$$

und

$$\bar{\eta} = 2\mu\eta + 2\mu'\eta'.$$

Man muß aus dieser Beziehung folgern, daß eine eindeutige doppeltperiodische Function ersten Grades nicht existirt.

Setzt man an Stelle v_m $v_m + 2\varpi$ und für

$$\sigma(u - v_m) = \pm e^{2\bar{\eta}(u - v_m - \varpi)} \sigma(u - v_m - 2\varpi),$$

so erhält $\varphi(u)$ die Gestalt:

$$\varphi(u) = C \prod_{\mu=1}^m \frac{\sigma(u - u_\mu)}{\sigma(u - v_\mu)},$$

aber hierin muß

$$\sum_{\mu=1}^m u_{\mu} = \sum_{\mu=1}^m v_{\mu}$$

sein. Man kann also $2m+1$ Größen v_{μ} , u_{μ} , C so bestimmen, daß die doppelperiodische Function $\varphi(u)$ m^{ten} Grades in dieser letzten Form erscheint, doch ist dann die Summe der Größen v_{μ} gleich der der Größen u_{μ} . Wenn umgekehrt die Größen u_{μ} , v_{μ} ($\mu = 1 \dots m$) die

Gleichung $\sum_{\mu=1}^m (u_{\mu} - v_{\mu}) = 0$ erfüllen und niemals eine der Größen u_{μ} einem v_{ν} congruent ist, so stellt

$$C \prod_{\mu=1}^m \frac{\sigma(u - u_{\mu})}{\sigma(u - v_{\mu})}$$

eine doppelperiodische Function m^{ten} Grades dar.

Bezeichnet u_0 eine den Größen u_{μ} und v_{μ} incongruente Stelle, so kann man endlich

$$\frac{\varphi(u)}{\varphi(u_0)} = \prod_{\mu=1}^m \frac{\sigma(u - u_{\mu})}{\sigma(u_0 - u_{\mu})} \frac{\sigma(u_0 - v_{\mu})}{\sigma(u - v_{\mu})}$$

setzen.

Da die doppelperiodische Function $\varphi(u) + A$ dieselben Unendlichkeitsstellen v_{μ} besitzt wie $\varphi(u)$ und die m Nullstellen \bar{u}_{μ} aus einem Periodenparallelogramme der Gleichung genügen:

$$\sum \bar{u}_{\mu} = \sum v_{\mu} + 2\omega$$

und ferner die Summe der Werthe des Argumentes, für welche $\varphi(u) + A$ gleich A ist, ebenfalls $\sum v_{\mu}$ congruent ist, so folgt, daß die Summe derjenigen Werthe aus einem Periodenparallelogramme, für welche eine doppelperiodische Function m^{ten} Grades ein und denselben Werth annimmt, bis auf Perioden constant ist.

Läßt man in unseren Formeln $\Re\left(\frac{\omega'}{\omega}\right)$ unendlich groß werden, in-
deß 2ω endlich und von Null verschieden bleibt, so wird aus $\varphi(u)$ eine eindeutige einfachperiodische Function hervorgehen, die im Endlichen den Charakter der rationalen Function besitzt. Berücksichtigt man, daß $\sigma(u - u')$ in den Ausdruck

$$e^{\frac{\pi^2}{6} \left(\frac{u-u'}{2\omega}\right)^2} \frac{2\omega}{\pi} \sin \frac{\pi(u-u')}{2\omega}$$

übergeht, so erhält man aus dem zuletzt angegebenen Ausdruck für $\frac{\varphi(u)}{\varphi(u_0)}$ die Function:

$$\prod_{\mu=1}^m \frac{\sin \frac{\pi(u-u_\mu)}{2\omega}}{\sin \frac{\pi(u_0-u_\mu)}{2\omega}} \frac{\sin \frac{\pi(u_0-v_\mu)}{2\omega}}{\sin \frac{\pi(u-v_\mu)}{2\omega}}$$

oder

$$\prod_{\mu=1}^m \frac{e^{\frac{(u-u_\mu)\pi i}{2\omega}} - e^{-\frac{(u-u_\mu)\pi i}{2\omega}}}{e^{\frac{(u_0-u_\mu)\pi i}{2\omega}} - e^{-\frac{(u_0-u_\mu)\pi i}{2\omega}}} \frac{e^{\frac{(u_0-v_\mu)\pi i}{2\omega}} - e^{-\frac{(u_0-v_\mu)\pi i}{2\omega}}}{e^{\frac{(u-v_\mu)\pi i}{2\omega}} - e^{-\frac{(u-v_\mu)\pi i}{2\omega}}},$$

die eine rationale Function der Exponentialfunction $e^{\frac{u\pi i}{\omega}}$ ist. Aber eine rationale Function von $e^{\frac{u\pi i}{\omega}}$, die im Endlichen keine wesentlich singuläre Stelle besitzt, wird nicht aufhören, einfach periodisch zu sein, wenn sie im Endlichen nicht dieselbe Anzahl von Null und Unendlichkeitsstellen aufweist. Ihr Ausdruck lautet:

$$R\left(e^{\frac{u\pi i}{\omega}}\right) = c \frac{\prod_{\mu=1}^p \left(e^{\frac{u\pi i}{\omega}} - e^{\frac{u_\mu\pi i}{\omega}}\right)}{\prod_{\nu=1}^q \left(e^{\frac{u\pi i}{\omega}} - e^{\frac{v_\nu\pi i}{\omega}}\right)}$$

und wenn man hierin

$$e^{\frac{u\pi i}{\omega}} - e^{\frac{u'\pi i}{\omega}} = e^{\frac{(u+u')\pi i}{2\omega}} \left(e^{\frac{(u-u')\pi i}{2\omega}} - e^{-\frac{(u-u')\pi i}{2\omega}} \right)$$

setzt, geht die Form:

$$C e^{(p-q)\frac{v\pi i}{2\omega}} \frac{\prod_{\mu=1}^p \sin(u-u_\mu) \frac{\pi}{2\omega}}{\prod_{\nu=1}^q \sin(u-v_\nu) \frac{\pi}{2\omega}}$$

hervor. Auch diese Function kann aus der doppeltperiodischen Function $\varphi(u)$ entspringen, wenn man nur zugleich mit $\Re\left(\frac{\omega'}{\omega i}\right)$ $m-p$ Nullstellen u_μ und $m-q$ Unendlichkeitsstellen in's Unendliche rücken läßt. In der That: zerlegt man u' in

$$\xi 2\omega + \xi' 2\omega'$$

und schreibt

$$\frac{u'}{2\omega} = \xi + i\xi' \left(\frac{\omega'}{\omega i}\right),$$

so ist ersichtlich, daß bei dem genannten Übergange von einem Factor

$$\frac{e^{\frac{(u-u')\pi i}{2\omega}} - e^{-\frac{(u-u')\pi i}{2\omega}}}{e^{\frac{(u_0-u')\pi i}{2\omega}} - e^{-\frac{(u_0-u')\pi i}{2\omega}}}$$

als Grenzausdruck nur

$$e^{\pm (u_0 - u) \frac{\pi i}{2\omega}}$$

übrig bleibt und das allein ist hier nothwendig.

§ 59. Neue Definition der doppelperiodischen Function $p(u)$.

Darstellung jeder doppelperiodischen Function durch $p(u)$
und die Ableitungen dieser Function.

Wir kehren zu den doppelperiodischen Functionen zurück.

Ist von den $(n+1)$ Größen

$$u_1, u_2, \dots, u_n, (u_1 + u_2 + \dots + u_n)$$

keine der Null congruent und sind von den ersten n keine zwei einander äquivalent, so ist nach den früheren Sätzen

$$\psi(u, u_1, u_2, \dots, u_n) = C_n \frac{\sigma(u + u_1 + \dots + u_n) \prod_{v=1}^n \sigma(u - u_v)}{\sigma^{n+1}(u)}$$

eine doppelperiodische Function $(n+1)$ ten Grades mit den Unendlichkeitsstellen $(n+1)$ ter Ordnung $w = 2\mu\omega + 2\mu'\omega'$ und den Nullstellen erster Ordnung $u_v + w$ ($v = 1, 2, \dots, n$) und $-(u_1 + u_2 + \dots + u_n) + w$.

Speciell hat die doppelperiodische Function zweiten Grades mit den zweifachen Unendlichkeitsstellen w die Gestalt:

$$\psi(u, u_1) = C_1 \frac{\sigma(u + u_1) \sigma(u - u_1)}{\sigma^2(u)}$$

wo u_1 der Null inäquivalent sein muß. Verfügt man über die Constante C_1 derart, daß die Entwicklung von $\psi(u, u_1)$ in der Umgebung der Stelle $u = 0$ mit dem Gliede $\frac{1}{u^2}$ beginnt, setzt also $C_1 = -\frac{1}{\sigma^2(u_1)}$, so hat die entstehende Function

$$\bar{\psi}(u, u_1) = -\frac{\sigma(u + u_1) \sigma(u - u_1)}{\sigma^2(u) \cdot \sigma^2(u_1)}$$

die Eigenthümlichkeit, von der uns schon bekannten doppelperiodischen Function

$$-\frac{d^2 \log \sigma(u)}{du^2} = p(u) = \frac{1}{u^2} + \sum_{\mu, \mu'} \left(\frac{1}{(u - \omega)^\mu} - \frac{1}{\omega^\mu} \right)$$

höchstens um eine ganze Function abweichen zu können, weil die Differenz $p(u) - \bar{\psi}(u, u_1)$ im Endlichen nicht unendlich wird. Diese ganze Function muß aber eine Constante sein, weil $p(u) - \bar{\psi}(u, u_1)$ doppelperiodisch ist und zwar ist ihr Werth $p(u_1)$, denn $p(u) - p(u_1)$ verschwindet ebenso wie $\bar{\psi}(u, u_1)$ an den Stellen $+u_1, -u_1$. Daher besteht die Formel

$$p(u) - p(u_1) = -\frac{\sigma(u + u_1) \sigma(u - u_1)}{\sigma^2(u) \sigma^2(u_1)}.$$

Zufolge dieser ist die doppeltperiodische Function mit der zweifachen Unendlichkeitsstelle $u = -v$ und den Nullstellen u_1 und $-(u_1 + 2v)$ durch den nachstehenden Ausdruck definirt:

$$c(p(u+v) - p(u_1+v)) = c \frac{\sigma(u_1-u) \sigma(u_1+2v+u)}{\sigma^2(v+u) \cdot \sigma^2(v+u_1)}.$$

Differentiirt man die vorletzte Gleichung logarithmisch nach u respective u_1 , so erhält man die Gleichungen:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma'(u+u_1)}{\sigma(u+u_1)} + \frac{\sigma'(u-u_1)}{\sigma(u-u_1)} - 2 \frac{\sigma'(u)}{\sigma(u)} &= \frac{p'(u)}{p(u) - p(u_1)} \\ \frac{\sigma'(u+u_1)}{\sigma(u+u_1)} - \frac{\sigma'(u-u_1)}{\sigma(u-u_1)} - 2 \frac{\sigma'(u_1)}{\sigma(u_1)} &= \frac{-p'(u_1)}{p(u) - p(u_1)} \end{aligned}$$

und darnach ist:

$$\frac{\sigma'(u \pm u_1)}{\sigma(u \pm u_1)} - \frac{\sigma'(u)}{\sigma(u)} = \pm \frac{\sigma'(u_1)}{\sigma(u_1)} + \frac{1}{2} \frac{p'(u) \mp p'(u_1)}{p(u) - p(u_1)}.$$

Die links stehende Function ist zugleich mit der rechts eine doppeltperiodische Function von u .

Bezeichnet man die Differenz $\frac{\sigma'(u+v)}{\sigma(u+v)} - \frac{\sigma'(u)}{\sigma(u)}$ mit $S(u, v)$, so muß nun die Determinante $(n+2)^{\text{ter}}$ Ordnung:

$$R = \begin{vmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & S(u_0, v_0) & \dots & S(u_0, v_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & S(u_n, v_0) & \dots & S(u_n, v_n) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \frac{\sigma'(u_0+v_0)}{\sigma(u_0+v_0)} & \dots & \frac{\sigma'(u_0+v_n)}{\sigma(u_0+v_n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \frac{\sigma'(u_n+v_0)}{\sigma(u_n+v_0)} & \dots & \frac{\sigma'(u_n+v_n)}{\sigma(u_n+v_n)} \end{vmatrix}$$

eine doppeltperiodische Function $(n+1)^{\text{ten}}$ Grades von u_0 sein, deren einfache Unendlichkeits- und Nullstellen

$$u_0 = -v_0, -v_1, \dots, -v_n$$

$$u_1 = u_1, u_2, \dots, u_n, -\left(v_0 + \sum_{r=1}^n (u_r + v_r)\right)$$

sind, auf dafs man

$$-R = C_n \frac{\sigma(u_0 + v_0 + u_1 + v_1 + \dots + u_n + v_n) \prod_{r=1}^n \sigma(u_0 - u_r)}{\prod_{r=1}^n \sigma(u_0 + v_r)}$$

setzen darf, wenn C_n eine von u_0 unabhängige Constaute bedeutet*). Doch weil die Determinante ebenso eine doppeltperiodische Function $(n+1)^{\text{ten}}$ Grades aller übrigen Argumente u_1, u_2, \dots, u_n und v_0, v_1, \dots, v_n ist, muß dieselbe die Form

*) Vergleiche Frobenius und Stickelberger in Borchardt's Journal Bd. 83.

$$\frac{\sigma(u_0 + v_0 + \dots + u_n + v_n) \prod_{\lambda, \mu} \sigma(u_\lambda - u_\mu) \prod_{\lambda, \mu} \sigma(v_\lambda - v_\mu)}{\prod_{\lambda, \mu} \sigma(u_\lambda + v_\mu)} = \Phi(u_0, v_0, \dots, u_n, v_n)$$

annehmen, wobei die in dem Zähler stehenden Producte nur über diejenigen Factoren $\sigma(u_\lambda - u_\mu)$ und $\sigma(v_\lambda - v_\mu)$ auszudehnen sind, in welchen $\lambda < \mu$, indess im Zähler alle $(n+1)^2$ Factoren $\sigma(u_\lambda + v_\mu)$ ($\lambda, \mu = 0, 1, 2 \dots n$) stehen. Die Determinante $-R$ ist aber gerade gleich dem letzten Ausdruck, d. h. es kommt jetzt keine Constante mehr hinzu. Für $n = 0$ ist das unmittelbar zu ersehen und allgemein läßt sich diese Behauptung durch den Schluß von n auf $n+1$ beweisen. Multiplicirt man nämlich die letzte Zeile der Determinante mit $u_n + v_n$ und setzt hierauf $u_n = -v_n$, so verschwinden alle Glieder bis auf das letzte

$$(u_n + v_n) \frac{\sigma'(u_n + v_n)}{\sigma(u_n + v_n)},$$

welches für $u_n = -v_n$ den Werth 1 annimmt, da die Entwicklung von $\sigma(u)$ nach Potenzen von u mit dem Gliede u beginnt. Die Determinante geht also in die entsprechende mit den $2n$ Argumenten $u_0, v_0, \dots, u_{n-1}, v_{n-1}$ über. Setzt man auch in dem $-R$ angeblich äquivalenten Ausdruck, nachdem er mit $u_n + v_n$ multiplicirt ist, $u_n = -v_n$ und bemerkt die Beziehungen:

$$\frac{\sigma'(u_n - u_\mu) \cdot \sigma(v_n - v_\mu)}{\sigma(u_n + u_\mu) \cdot \sigma(v_n + v_\mu)} = 1 \quad (\mu = 0, 1, 2 \dots n-1)$$

und

$$\lim \frac{u_n + v_n}{\sigma(u_n + v_n)} = 1,$$

derentwegen dieser Ausdruck ebenfalls in den analog aus den Argumenten $u_0, v_0, \dots, u_{n-1}, v_{n-1}$ gebildeten übergeht, so erscheint der Beweis erbracht. —

Schließlich kann man die doppelperiodische Function $(n+1)$ ten Grades Φ noch rational durch die Function p und deren erste Ableitung p' ausdrücken, denn es ist offenbar auch

$$-R = - \begin{vmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \frac{1}{2} \frac{p'(u_0) - p'(v_0)}{p(u_0) - p(v_0)} & \dots & \frac{1}{2} \frac{p'(u_0) - p'(v_n)}{p(u_0) - p(v_n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \frac{1}{2} \frac{p'(u_n) - p'(v_0)}{p(u_n) - p(v_0)} & \dots & \frac{1}{2} \frac{p'(u_n) - p'(v_n)}{p(u_n) - p(v_n)} \end{vmatrix}.$$

Da man aber der doppelperiodischen Function zweiten Grades mit den zwei Unendlichkeitsstellen $-v_0$ und $-v_1$ und den Nullstellen u_1 und $-(v_0 + u_1 + v_1)$ die Gestalt

$$c \frac{p\left(u + \frac{v_0 + v_1}{2}\right) - p\left(u_1 + \frac{v_0 + v_1}{2}\right)}{p\left(u + \frac{v_0 + v_1}{2}\right) - p\left(-v_0 + \frac{v_0 + v_1}{2}\right)}$$

geben kann, indess dieselbe Function hier in der Form

$$C \left[\left(\frac{1}{2} \frac{p'(u) - p'(v_0)}{p(u) - p(v_0)} - \frac{1}{2} \frac{p'(u_1) - p'(v_0)}{p(u_1) - p(v_0)} \right) - \left(\frac{1}{2} \frac{p'(u) - p'(v_1)}{p(u) - p(v_1)} - \frac{1}{2} \frac{p'(u_1) - p'(v_1)}{p(u_1) - p(v_1)} \right) \right]$$

erscheint, werden wir gewahr, daß die Function $p(u + v)$ nothwendig durch $p(u)$, $p(v)$, $p'(u)$, $p'(v)$ darstellbar ist; doch darauf richten wir erst späterhin unsere Aufmerksamkeit.

Vorderhand interessirt es uns, auch die zu Beginn dieses Paragraphen aufgestellte doppeltperiodische Function $(n + 1)^{\text{ten}}$ Grades mit den Unendlichkeitsstellen w $(n + 1)^{\text{ter}}$ Ordnung rational durch $p(u)$ und $p'(u)$ auszudrücken. Wenngleich man zu diesem Zwecke in der früheren Determinante R die Stellen $-v_0, -v_1, \dots -v_n$ alle nach der Stelle Null zusammenrücken lassen könnte, wollen wir, anstatt diesen Grenzübergang zu bewerkstelligen, direct die doppeltperiodische Function:

$$\varphi(u, u_1, \dots u_n) = \begin{vmatrix} 1 & p(u) & p'(u) & \dots & p^{(n-1)}(u) \\ 1 & p(u_1) & p'(u_1) & \dots & p^{(n-1)}(u_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & p(u_n) & p'(u_n) & \dots & p^{(n-1)}(u_n) \end{vmatrix}$$

mit den Unendlichkeitsstellen w der $(n + 1)^{\text{ten}}$ Ordnung und den Nullstellen

$$u_1, u_2, \dots u_n \text{ und } -(u_1 + u_2 + \dots + u_n)$$

mit der Function

$$\psi(u, u_1, \dots u_n) = \frac{\sigma(u + u_1 + \dots + u_n) \prod_{r=1}^n \sigma(u - u_r)}{\sigma^{n+1}(u)}$$

vergleichen.

Der Quotient beider kann nur eine von u unabhängige Constante C_n sein, doch weil die Entwicklung von φ in der Umgebung von $u = 0$ mit dem Gliede

$$(-1)^{2n-1} \frac{n!}{u^{n+1}} \varphi(u_1, u_2, \dots u_n),$$

diejenige von $\psi(u, u_1, \dots u_n)$ mit

$$(-1)^n \sigma(u_1 + u_2 + \dots + u_n) \sigma(u_1) \sigma(u_2) \dots \sigma(u_n) - \frac{1}{u^{n+1}}$$

beginnt, muß

$$-C_n = \frac{(-1)^n n! \varphi(u_1, u_2, \dots u_n)}{\sigma(u_1 + u_2 + \dots + u_n) \sigma(u_1) \sigma(u_2) \dots \sigma(u_n)}$$

sein. Bildet man successive:

$$\begin{aligned} \varphi(u, u_1) &= \left| \begin{matrix} 1 & p(u) \\ 1 & p(u_1) \end{matrix} \right| = \frac{\sigma(u+u_1)\sigma(u-u_1)}{\sigma^2(u)\sigma^2(u_1)}, \\ \varphi(u, u_1, u_2) &= -1!2! \frac{\sigma(u+u_1+u_2)\sigma(u-u_1)\sigma(u-u_2)\sigma(u_1-u_2)}{\sigma^3(u)\sigma^3(u_1)\sigma^3(u_2)}, \\ \varphi(u, u_1, u_2, u_3) &= \\ &= 1!2!3! \frac{\sigma(u+u_1+u_2+u_3)\sigma(u-u_1)\sigma(u-u_2)\sigma(u-u_3)\sigma(u_1-u_2)\sigma(u_1-u_3)\sigma(u_2-u_3)}{\sigma^4(u)\sigma^4(u_1)\sigma^4(u_2)\sigma^4(u_3)} \\ \text{usw., so folgt durch den Schlufs von } n \text{ auf } n+1 \\ \varphi(u, u_1, u_2, \dots, u_n) &= \\ &= (-1)^{\frac{n(n-1)}{2}} 1!2! \dots n! \frac{\sigma(u+u_1+u_2+\dots+u_n) \prod_{\nu=1}^n \sigma(u-u_\nu) \cdot \prod_{\lambda, \mu} \sigma(u_\lambda-u_\mu)}{\sigma^{n+1}(u) \cdot \prod_{\nu=1}^n \sigma^{n+1}(u_\nu)} \end{aligned}$$

wo wieder $\lambda < \mu$ ($\lambda, \mu = 1, 2, \dots, n$) sein mufs.

Sind nicht allein die Gröfsen

$$u_1, u_2, \dots, u_n, (u_1 + u_2 + \dots + u_n),$$

sondern auch

$$v_1, v_2, \dots, v_n, (v_1 + v_2 + \dots + v_n)$$

$(n+1)$ der Null inäquivalente Gröfsen und werden die Differenzen

$$u_1 - u_\mu, u_1 - v_\mu, v_1 - v_\mu$$

nicht zu Perioden, so ist der Quotient

$$C \frac{\varphi(u, u_1, \dots, u_n)}{\varphi(v, v_1, \dots, v_n)} = \varphi(u)$$

eine doppeltperiodische Function $(n+1)$ ten Grades mit den Nullstellen

$$u_1, u_2, \dots, u_n, -(u_1 + u_2 + \dots + u_n)$$

und den Unendlichkeitsstellen

$$v_1, v_2, \dots, v_n, -(v_1 + v_2 + \dots + v_n)$$

und $\varphi(u)$ kann als rationale Function von $p(u)$ und deren $(n-1)$ ersten Ableitungen dargestellt werden*). Die doppeltperiodische Function zweiten Grades mit den einfachen Null- und Unendlichkeitsstellen u_1 und $-u_1$ respective v_1 und $-v_1$ erscheint aber wieder als lineare Function von $p(u)$ allein:

$$C \frac{p(u) - p(u_1)}{p(u) - p(v_1)}$$

und wir erschliessen, dafs $p(u)$ und $p'(u)$ in einer algebraischen Beziehung stehen, was ja auch nöthig ist, damit die Darstellungen von

$$C \frac{\varphi(u, u_1, u_2, \dots, u_n)}{\varphi(u, v_1, v_2, \dots, v_n)} \quad \text{und} \quad \Phi(u, \bar{v}_0, u_1, \bar{v}_1, \dots, u_n, \bar{v}_n)$$

*) Formeln und Lehrsätze § 14.

für $\bar{v}_\nu = -v_\nu$ ($\nu = 1, 2, \dots, n$) und $\bar{v}_0 = \sum_{\nu=1}^n v_\nu$ übereinkommen können.

Man muß die Ableitungen $p^{(\nu)}(u)$ ($\nu = 2, 3, \dots$) als rationale Functionen von $p(u)$ und $p'(u)$ ausdrücken können.

Bevor wir hierauf eingehen, besprechen wir noch eine weitere Darstellung jeder eindeutigen doppeltperiodischen Function

$$\varphi(u) = C \prod_{\nu=1}^n \frac{\sigma(u - u_\nu)}{\sigma(u - v_\nu)}.$$

Nehmen wir an, daß $\varphi(u)$ nur an m von einander verschiedenen und incongruenten Stellen v_1, v_2, \dots, v_m unendlich werde und da in den Ordnungen

$$n_1, n_2, \dots, n_m,$$

worauf $\sum_{\mu=1}^m n_\mu = n$ ist, und lautet die Entwicklung in der Umgebung von v_μ

$$-\frac{C_\mu^{(n_\mu)}}{(u - v_\mu)^{n_\mu}} + \dots + \frac{C_\mu^{(1)}}{(u - v_\mu)} + \mathfrak{P}(u - v_\mu),$$

so setze man

$$\begin{aligned} \varphi(u, v_\mu) &= C_\mu^{(1)} \frac{\sigma'(u - v_\mu)}{\sigma(u - v_\mu)} - \frac{1}{1!} C_\mu^{(2)} \frac{d}{du} \frac{\sigma'(u - v_\mu)}{\sigma(u - v_\mu)} + \dots \\ &+ (-1)^{n_\mu-1} \frac{d^{n_\mu-1}}{du^{n_\mu-1}} \frac{\sigma'(u - v_\mu)}{\sigma(u - v_\mu)}, \end{aligned}$$

dann kann die Differenz

$$\varphi(u) - \sum_{\mu=1}^m \varphi(u, v_\mu)$$

im Endlichen nirgends unendlich werden und ist einer ganzen Function $g(u)$ gleich zu setzen. Weil aber:

$$\frac{d}{du} \left(\varphi(u) - \sum_{\mu=1}^m \varphi(u, v_\mu) \right) = \varphi'(u) + \sum_{\mu=1}^m \sum_{\lambda=1}^{n_\mu} \frac{(-1)^{\lambda-1}}{(\lambda-1)!} C_\mu^{(\lambda)} p^{(\lambda-1)}(u - v_\mu)$$

eine doppeltperiodische Function ist, kann $g'(u)$ nur eine Constante C_1 und $g(u) = C_1 u + C$ sein. Setzt man nun in der Gleichung

$$\varphi(u) - \sum_{\mu=1}^m \varphi(u, v_\mu) - (C_1 u + C) = 0$$

an Stelle von u $u + 2\omega$ und dann $u + 2\omega'$, so erhält man mit Rücksicht auf die schon abgeleitete Beziehung

$$\frac{\sigma(u + 2\omega)}{\sigma(u)} = \frac{\sigma'(u)}{\sigma(u)} + 2\eta \quad (\omega = p\omega + q\omega', \quad \eta = p\eta + q\eta')$$

die Relationen

$$2\eta \sum_{\mu=1}^m C_{\mu}^{(1)} - 2\omega C_1 = 0, \quad 2\eta' \sum_{\mu=1}^m C_{\mu}^{(1)} - 2\omega' C_1 = 0,$$

und weil die Determinante dieser Gleichungen nicht Null ist, hat man

$$C_1 = 0 \quad \text{und} \quad C_1^{(1)} + C_2^{(1)} + \dots + C_m^{(1)} = 0.$$

Dann aber besteht die Formel:

$$\varphi(u) = C + \sum_{\mu=1}^m C_{\mu}^{(1)} \frac{\sigma'(u-v_{\mu})}{\sigma(u-v_{\mu})} + \sum_{\mu=1}^m \sum_{\lambda=1}^{n_{\mu}-1} \frac{(-1)^{\lambda} C_{\mu}^{(\lambda)}}{\lambda!} \frac{d^{\lambda}}{du^{\lambda}} \frac{\sigma'(u-v_{\mu})}{\sigma(u-v_{\mu})}^{*}$$

und wenn speciell $\varphi(u)$ an der Stelle $u=0$ von der n^{ten} Ordnung unendlich ist, wird $C_1^{(1)} = 0$ und

$$\begin{aligned} \varphi(u) &= C + C^{(2)} p(u) - \frac{C^{(3)}}{2!} p'(u) + \dots + \frac{(-1)^n}{(n-1)!} C^{(n)} p^{(n-2)}(u) \\ &= a_0 + a_2 p(u) + a_3 p'(u) + \dots + a_n p^{(n-2)}(u), \end{aligned}$$

wo man über die Constanten derart verfügen kann, daß $\varphi(u)$ an $(n-1)$ vorgegebenen Stellen u , verschwindet. Die letzte n^{te} Nullstelle geht dann aus der Gleichung

$$u_1 + u_2 + \dots + u_n = 0$$

hervor.

§ 60. Gleichung zwischen $p(u)$ und $p'(u)$.

Um zu erkennen, in welcher Beziehung $p(u)$ und $p'(u)$ zu einander stehen**), stellen wir die doppeltperiodische Function dritten Grades $p'(u)$ mit der dreifachen Unendlichkeitsstelle $u=0$ und den Nullstellen $u=\omega, \omega', -(\omega+\omega')$ durch die Function $\sigma(u)$ dar. Weil das Anfangsglied der Entwicklung von $p'(u)$ um die Stelle $u=0 - \frac{2}{u^3}$ ist, hat man

$$p'(u) = -2 \frac{\sigma(\omega+\omega'+u) \sigma(u-\omega) \sigma(u-\omega')}{\sigma^3(u) \sigma(\omega) \sigma(\omega') \sigma(\omega+\omega')},$$

doch weil $p'(u)$ eine ungerade Function ist, gilt auch

$$-p'(-u) = p'(u) = -2 \frac{\sigma(\omega+\omega'-u) \sigma(u+\omega) \sigma(u+\omega')}{\sigma^3(u) \sigma(\omega) \sigma(\omega') \sigma(\omega+\omega')}.$$

Bezeichnet man $\omega+\omega'$ mit ω'' , so gibt die Multiplication der beiden Ausdrücke für $p'(u)$ die Gleichung

$$(p'(u))^2 = 4 \frac{\sigma(\omega+u) \sigma(\omega-u)}{\sigma^2(u) \sigma^2(\omega)} \frac{\sigma(\omega''+u) \sigma(\omega''-u)}{\sigma^2(u) \sigma^2(\omega'')} \frac{\sigma(\omega'+u) \sigma(\omega'-u)}{\sigma^2(u) \sigma^2(\omega')}$$

oder

$$(p'(u))^2 = 4 (p(u) - p(\omega)) (p(u) - p(\omega'')) (p(u) - p(\omega')).$$

*) Kiepert l. c. p. 25.

**) Kiepert l. c. p. 24.

Schreibt man für

$$p(\omega) = e_1, \quad p(\omega'') = e_2, \quad p(\omega') = e_3,$$

$$e_1 + e_2 + e_3 = \frac{g_1}{4}, \quad e_1 e_2 + e_1 e_3 + e_2 e_3 = -\frac{g_2}{4}, \quad e_1 e_2 e_3 = \frac{g_3}{4},$$

so erhält die letzte Gleichung die Gestalt:

$$(p'(u))^2 = 4(p(u) - e_1)(p(u) - e_2)(p(u) - e_3)$$

$$(p'(u))^2 = 4p^3(u) - g_1 p^2(u) - g_2 p(u) - g_3.$$

Die Coefficienten g_1, g_2, g_3 können wir berechnen, indem wir $p(u)$ und $p'(u)$ mit Hilfe der Darstellungen

$$p(u) = \frac{1}{u^2} + \sum'_{\mu, \mu'} \left(\frac{1}{(u-w)^2} - \frac{1}{w^2} \right), \quad p'(u) = -2 \sum'_{\mu, \mu'} \frac{1}{(u-w)^3}$$

in der Umgebung der Stelle $u = 0$ nach Potenzen von u entwickeln, die so zu gewinnenden Reihen in der letzten Gleichung einsetzen und die gleichnamigen Coefficienten vergleichen.

Bildet man

$$\begin{aligned} p(u) &= \frac{1}{u^2} + \sum' \left(\frac{1}{w^2 \left(1 - \frac{u}{w}\right)^2} \right) \\ &= \frac{1}{u^2} + \sum'_{\mu, \mu'} \left(\frac{2}{w^2} \frac{u}{w} + \frac{3}{w^2} \left(\frac{u}{w}\right)^2 + \frac{4}{w^2} \left(\frac{u}{w}\right)^3 + \dots \right) \end{aligned}$$

und beachtet, daß die unbedingt convergenten Summen

$$\sum'_{\mu, \mu'} \frac{1}{w^{2\nu+1}} \quad (\nu = 1, 2, 3, \dots)$$

verschwinden, und bezeichnet man die Summe $\sum'_{\mu, \mu'} \frac{1}{w^{2\nu}}$ mit c_ν , so folgt

$$p(u) = \frac{1}{u^2} + \sum_{\nu=1}^{\infty} (2\nu - 1) c_\nu u^{2\nu-2}$$

und darum wird

$$p'(u) = -\frac{2}{u^3} + 2 \sum_{\nu=2}^{\infty} (2\nu - 1)(\nu - 1) c_\nu u^{2\nu-3}$$

$$p^2(u) = \frac{1}{u^4} + 6c_2 + 10c_3 u^2 + (14c_4 + 9c_2^2) u^4 + \dots$$

$$p^3(u) = \frac{1}{u^6} + \frac{9c_2}{u^4} + 15c_3 + (21c_4 + 27c_2^2) u^2 + \dots$$

$$(p'(u))^2 = \frac{4}{u^6} - \frac{24c_2}{u^4} - 80c_3 - (168c_4 - 12c_2^2) u^2 + \dots$$

Dann aber ergeben sich die Beziehungen:

$$g_1 = 0, \quad -24c_2 = 36c_2 - g_2, \quad -80c_3 = 60c_3 - g_3$$

oder

$$g_1 = 4(e_1 + e_2 + e_3) = 4(p(\omega) + p(\omega'') + p(\omega')) = 0$$

$$g_2 = -4(e_1 e_2 + e_1 e_3 + e_2 e_3) = 2(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2) = 60 \sum_{\mu, \mu'} \frac{1}{\omega^4}$$

$$g_3 = 4e_1 e_2 e_3 = 140 \sum_{\mu, \mu'} \frac{1}{\omega^6}$$

und alle übrigen Größen

$$c_\nu = \sum_{\mu, \mu'} \frac{1}{(2\mu\omega + 2\mu'\omega')^{2\nu}} \quad (\nu = 4, 5, 6 \dots)$$

werden ganze Functionen von g_2 und g_3 oder c_2 und c_3 .

- Die verlangte Gleichung zwischen $p(u)$ und $p'(u)$ lautet jetzt

$$(p'(u))^2 = 4p^3(u) - g_2 p(u) - g_3.$$

Doch damit wird

$$p''(u) = 6p^2(u) - \frac{1}{2}g_2, \quad p^{(3)}(u) = 12p(u)p'(u),$$

$$p^{(4)}(u) = 120p^3(u) - 18g_2 p(u) - 12g_3,$$

$$p^{(5)}(u) = (360p^2(u) - 18g_2)p'(u)$$

usw. Allgemein ist jede gerade Ableitung $p^{(2\nu)}(u)$ eine ganze Function von $p(u)$ allein $G(p(u))$, hingegen $p^{(2\nu+1)}(u)$ hat die Gestalt $G'(p) \cdot p'(u)$, denn der Schluss von n auf $(n+1)$ gibt in der That:

$$p^{(2\nu+2)}(u) = G''(p)(4p^3(u) - g_2 p(u) - g_3) + G'(p)(6p^2(u) - \frac{1}{2}g_2) = G_1(p)$$

$$p^{(2\nu+3)}(u) = G_1'(p) \cdot p'(u).$$

Jetzt läßt sich mit Rücksicht auf die Entwicklungen des vorigen Paragraphen der allgemeine Satz aussprechen:

Jede zu einem Periodenpaare $(2\omega, 2\omega')$ gehörige eindeutige doppelt-periodische Function $\varphi(u)$, die im Endlichen vom Charakter der rationalen Function ist, läßt sich rational durch die zu demselben Periodenpaare gehörende Function $p(u)$ und deren erste Ableitung $p'(u)$ ausdrücken.

Wenn $\varphi(u)$ und $\varphi'(u)$ rationale Functionen von $p(u)$ und $p'(u)$ sind:

$$\varphi(u) = R_1(p(u), p'(u)), \quad \varphi'(u) = R_2(p(u), p'(u)),$$

mufs auch eine algebraische Gleichung zwischen $\varphi(u)$ und $\frac{d\varphi(u)}{du}$ bestehen, denn die Elimination von $p(u)$ und $p'(u)$ aus den Ausdrücken für $\varphi(u)$ und $\varphi'(u)$ liefert eine solche Gleichung

$$G\left(\frac{d\varphi}{du}, \varphi\right) = 0.$$

§ 61. Differentialgleichung für die doppeltperiodische Function zweiten Grades.

Es soll speciell die Differentialgleichung $G\left(\frac{d\varphi}{du}, \varphi\right) = 0$ ermittelt werden, welcher jede doppeltperiodische Function φ zweiten Grades genügt.

Hat φ die Unendlichkeitsstellen erster Ordnung

$$u = v + 2\mu\omega + 2\mu'\omega',$$

so läßt sich φ in einer endlichen Umgebung der Stelle $u = v$ in der Form

$$\varphi = \frac{a}{u-v} + \mathfrak{P}(u-v) = \frac{a}{u-v} \mathfrak{P}_1(u-v)$$

darstellen und in dem Convergenzbereiche von \mathfrak{P} oder \mathfrak{P}_1 wird

$$\frac{d\varphi}{du} = -\frac{a}{(u-v)^2} + \mathfrak{P}'(u-v).$$

Entlehnt man der ersten Gleichung oder vielmehr der Gleichung

$$\frac{a}{\varphi} = (u-v) \mathfrak{P}_1^{-1}(u-v)$$

eine Darstellung von $(u-v)$ in der Umgebung der Stelle $\varphi = \infty$:

$$(u-v) = \frac{1}{\varphi} \mathfrak{P}\left(\frac{1}{\varphi}\right),$$

so erhält $\frac{d\varphi}{du}$, als Function von φ aufgefaßt, die Form

$$\frac{d\varphi}{du} = a_2 \varphi^2 + a_1 \varphi + a_0 + \sum_{v=1}^{\infty} \frac{b_v}{\varphi^v}.$$

Gibt man nun φ einen Werth φ_0 , so sind die unendlich vielen zugehörigen Werthe des Argumentes u entweder congruent oder es ist die Summe irgend zweier incongruenter Werthe u_1 und u_2 bis auf eine Periode ω constant gleich $2c$. Aus der Congruenz

$$u_1 + u_2 \equiv 2c \quad c_1 + c_2$$

folgt aber

$$\frac{du_1}{d\varphi} = -\frac{du_2}{d\varphi}$$

und man erkennt, daß $\frac{d\varphi}{du}$ als Function von φ nur zweideutig und $\left(\frac{d\varphi}{du}\right)^2$ eindeutig ist. Da aber die Ableitung einer eindeutigen Function φ , die im Endlichen nur außerwesentlich singuläre Stellen besitzt, nur mit φ selbst unendlich wird, muß $\left(\frac{d\varphi}{du}\right)^2$ eine ganze Function von φ sein und in der Entwicklung

$$\left(\frac{d\varphi}{du}\right)^2 = A\varphi^4 + 4B\varphi^3 + 6C\varphi^2 + 4D\varphi + E + \sum_{v=1}^{\infty} \frac{B_v}{\varphi^v}$$

sind alle Coefficienten B , Null zu setzen. Die Differentialgleichung, der φ genügt, lautet daher:

$$\left(\frac{d\varphi}{du}\right)^2 = A\varphi^4 + 4B\varphi^3 + 6C\varphi^2 + 4D\varphi + E$$

oder

$$\left(\frac{d\varphi}{du}\right)^2 = A(\varphi - a_1)(\varphi - a_2)(\varphi - a_3)(\varphi - a_4).$$

Besitzt die Function φ nur Unendlichkeitsstellen zweiter Ordnung $v + w$, so hat man

$$\varphi = \frac{a}{(u-v)^2} + \mathfrak{P}(u-v),$$

aber niemals

$$\varphi = \frac{a}{(u-v)^2} + \frac{b}{(u-v)} + \mathfrak{P}(u-v)$$

anzusetzen, denn nach dem Früheren hat ja $\varphi(u)$ die Gestalt

$$a_0 + a_2 p(u-v).$$

Entwickelt man $u-v$ nach steigenden Potenzen von (φ^{-1}) :

$$u-v = \frac{1}{\varphi^2} \mathfrak{P}\left(\frac{1}{\varphi^2}\right),$$

so bekömmt die Ableitung

$$\frac{d\varphi}{du} = \frac{-2a}{(u-v)^3} + \mathfrak{P}'(u-v)$$

als Function von φ die Form:

$$\frac{d\varphi}{du} = a_3 \varphi^{\frac{3}{2}} + a_2 \varphi^{\frac{1}{2}} + a_1 \varphi^{-\frac{1}{2}} + a_0 + \frac{1}{\varphi^{\frac{3}{2}}} \mathfrak{P}\left(\frac{1}{\varphi^2}\right).$$

Doch weil

$$\left(\frac{d\varphi}{du}\right)^2 = A\varphi^3 + 3B\varphi^2 + 3C\varphi + D + \dots$$

wieder eine eindeutige und ganze Function von φ ist, wird die Differentialgleichung lauten:

$$\left(\frac{d\varphi}{du}\right)^2 = A\varphi^3 + 3B\varphi^2 + 3C\varphi + D = A(\varphi - e_1)(\varphi - e_2)(\varphi - e_3).$$

Es handelt sich nun darum, die Bedeutung der Gröfsen a_1, a_2, a_3, a_4 beziehungsweise e_1, e_2, e_3 zu ergründen.

Ist die Summe zweier zu demselben Functionswerthe φ gehöriger inäquivalenter Argumentswerthe u bis auf eine Periode $2c$, so wird

$$\varphi'(u) = -\varphi'(2c - u),$$

d. h. die Ableitungen haben an den Stellen u und $2c - u$ entgegengesetzte Werthe. Nimmt man an, daß φ nur Unendlichkeitsstellen erster Ordnung besitzt, so muß $\varphi'(u)$ an der Stelle $u=c$ endlich sein, denn andernfalls hätte $\varphi(u)$ die Unendlichkeitsstellen $u = c + w$ zweiter Ordnung. Man muß dann wegen der Gleichungen

$$\varphi'(c) = \varphi'(c) \quad \text{und} \quad \varphi'(c) = -\varphi'(c)$$

$\varphi'(c) = 0$ setzen und erfährt, daß einer der Werthe a_1, a_2, a_3, a_4 $\varphi(c)$ ist.

Gibt man u die Werthe $c + \omega, c + \omega', c + \omega''$, so erhält man die drei Gleichungen

$$\begin{aligned}\varphi'(c + \omega) &= -\varphi'(c - \omega) = -\varphi'(c + \omega) \\ \varphi'(c + \omega') &= -\varphi'(c - \omega') = -\varphi'(c + \omega') \\ \varphi'(c + \omega'') &= -\varphi'(c - \omega'') = -\varphi'(c + \omega''),\end{aligned}$$

aus welchen man erschließt, daß $\varphi'(u)$ an den Stellen

$$u = c + \omega, c + \omega', c + \omega''$$

verschwindet, und weil die Summe je zweier der vier gefundenen Werthe für u der Größe $2c$ inäquivalent ist, sind die zugehörigen Functionswerthe von einander verschieden und somit sind die Größen a_1, a_2, a_3, a_4 nichts anderes als die Functionwerthe

$$\varphi(c), \varphi(c + \omega), \varphi(c + \omega'), \varphi(c + \omega'').$$

Man schreibt daher

$$\left(\frac{d\varphi(u)}{du}\right)^2 = A(\varphi(u) - \varphi(c))(\varphi(u) - \varphi(c + \omega))(\varphi(u) - \varphi(c + \omega''))(\varphi(u) - \varphi(c + \omega'))$$

und desgleichen gilt

$$\left(\frac{d\varphi(u)}{du}\right)^2 = A(\varphi(u) - \varphi(c + \omega))(\varphi(u) - \varphi(c + \omega''))(\varphi(u) - \varphi(c + \omega')),$$

wenn $\varphi(u)$ nur außerwentlich singuläre Stellen zweiter Ordnung besitzt. *)

Diese Differentialgleichungen

$$\left(\frac{d\varphi}{du}\right)^2 = G(\varphi)$$

dienen nebst einer Anfangsbedingung, welche einem beliebigen Werthe

*) Die doppeltperiodische Function n^{ten} Grades mit den einfachen Unendlichkeitsstellen

$$v_1, v_2, \dots, v_n$$

in einem Periodenparallelogramm läßt daselbst die Darstellung

$$\varphi = \sum_{v=1}^n \frac{a_v}{u - v_v} + \Phi(u)$$

zu, wenn $\Phi(u)$ in dem Parallelogramm regulären Verhaltens ist, dieselben Schlüssen wie früher und die Bemerkung, daß die elementaren symmetrischen

Functionen von $\left(\frac{d\varphi}{du}\right)_{u=v_v}$ ($v = 1, 2, \dots, n$) eindeutige ganze Functionen $f(\varphi)$ von

nicht höherem Grade als dem 2^{ten} , 4^{ten} und dem $2n^{\text{ten}}$ sind, läßt wieder erkennen, daß φ einer Differentialgleichung erster Ordnung und n^{ten} Grades genügt:

$$\left(\frac{d\varphi}{du}\right)^n - f_1(\varphi)\left(\frac{d\varphi}{du}\right)^{n-1} + \dots + (-1)^{n-1} f_{2n-2}(\varphi) \frac{d\varphi}{du} + (-1)^n f_{2n}(\varphi) = 0,$$

wo die Indices der Functionen $f(\varphi)$ die höchst möglichen Gradzahlen anzeigen.

von u einen von den Nullstellen der ganzen Function $G(\varphi)$ verschiedenen Functionalwerth willkürlich zuordnet, zur Definition der doppelperiodischen Function zweiten Grades. Weil jede solche Function als lineare Function von $p(u)$ oder $p(u+v)$ darstellbar war, wo v eine Constante ist, kann man die genannten Differentialgleichungen durch lineare Substitutionen ineinander transformiren und speciell die eine untersuchen, welcher $p(u)$ genügt.

Wir wollen daher die Frage, was die doppelperiodische Function zweiten Grades $\varphi(u)$ für eine Beschaffenheit erhält, wenn zwei Wurzeln der Gleichung $G(\varphi) = 0$ einander gleich werden, dahin specialisiren, daß wir nur die Beschaffenheit von $p(u)$ erforschen, wenn die Gleichung

$$G(p) = 4p^3 - g_2 p - g_3 = 4(p - e_1)(p - e_2)(p - e_3) = 0$$

zwei gleiche Wurzeln hat. Da aber $e_1 = p(\omega)$, $e_2 = p(\omega')$, $e_3 = p(\omega'')$ ist, kann die Gleichheit zweier Wurzeln e_k nur ein besonderes Verhältniß der Perioden 2ω und $2\omega'$ nach sich ziehen.

Es liegt nahe zunächst festzusetzen, daß $\Re\left(\frac{\omega'}{\omega}\right)$ unendlich wird, während ω von Null verschieden ist. Weil dann

$$\frac{\sigma'(u)}{\sigma(u)} = \frac{\pi}{2\omega} \cotg \frac{u\pi}{2\omega} + \frac{1}{3} \left(\frac{\pi}{2\omega}\right)^2 u$$

ist, wird

$$-\frac{d^2 \log \sigma(u)}{du^2} = p(u) = \left(\frac{\pi}{2\omega}\right)^2 \frac{1}{\sin^2 \left(\frac{u\pi}{2\omega}\right)} - \frac{1}{3} \left(\frac{\pi}{2\omega}\right)^2$$

$$p'(u) = -2 \left(\frac{\pi}{2\omega}\right)^2 \frac{\cos \left(\frac{u\pi}{2\omega}\right)}{\sin^3 \left(\frac{u\pi}{2\omega}\right)}$$

d. h. $p(u)$ und seine Ableitungen sind nur mehr einfachperiodische Functionen.

Substituirt man diese Ausdrücke in die Gleichung

$$(p'(u))^2 = 4p^3(u) - g_2 p(u) - g_3,$$

so erhält man die Beziehungen:

$$g_2 = \frac{4}{3} \left(\frac{\pi}{2\omega}\right)^4, \quad g_3 = \frac{8}{27} \left(\frac{\pi}{2\omega}\right)^6$$

und somit

$$\left(\frac{\pi}{2\omega}\right)^2 = \frac{9}{2} \frac{g_2}{g_3}, \quad g_2^3 - 27g_3^2 = 16(e_2 - e_3)^2(e_3 - e_1)^2(e_1 - e_2)^2 = 0.$$

Es müssen daher zwei Wurzeln e_k einander gleich sein, und zwar hat man:

$$p(\omega) = e_1 = \left(\frac{\pi}{2\omega}\right)^2 \frac{1}{\sin^2 \left(\frac{\pi}{2}\right)} - \frac{1}{3} \left(\frac{\pi}{2\omega}\right)^2 = \frac{2}{3} \left(\frac{\pi}{2\omega}\right)^2 = 3 \frac{g_2}{g_3}$$

$$e_2 = e_3 = -\frac{3}{2} \frac{g_2}{g_3} = -\frac{1}{3} \left(\frac{\pi}{2\omega}\right)^2$$

zu setzen. Umgekehrt erfordert auch die Gleichheit der Lösungen e_2 und e_3 , daß die doppeltperiodische Function in eine einfachperiodische übergeht.

Sind gar alle drei Wurzeln e_k einander gleich, so folgt wegen der Gleichung $e_1 + e_2 + e_3 = 0$

$$e_1 = 0, \quad g_2 = 0, \quad g_3 = 0,$$

und der Differentialgleichung

$$\left(\frac{dp(u)}{du}\right)^2 = 4p^3(u)$$

genügt die rationale Function

$$p(u) = \frac{1}{u^2},$$

wenn dem Werthe $u = 0$ $p(u) = \infty$ zugeordnet wird.

§ 61. Additionstheorem der doppeltperiodischen Functionen.

Um die früher erwähnte Darstellung von $p(u+v)$ durch $p(u)$, $p(v)$, $p'(u)$, $p'(v)$ zu vollziehen, beachte man, daß die doppeltperiodische Function dritten Grades:

$$\begin{aligned} \varphi(u, u_1, u_2) &= \begin{vmatrix} 1 & p(u) & p'(u) \\ 1 & p(u_1) & p'(u_1) \\ 1 & p(u_2) & p'(u_2) \end{vmatrix} \\ &= -2 \frac{\sigma(u+u_1+u_2) \sigma(u-u_1) \sigma(u-u_2) \sigma(u_1-u_2)}{\sigma^3(u) \sigma^3(u_1) \sigma^3(u_2)} \end{aligned}$$

für $u = -(u_1 + u_2)$ verschwindet und daher die Gleichung;

$$\begin{aligned} p'(u_1+u_2) (p(u_1) - p(u_2)) + p(u_1+u_2) (p'(u_1) - p'(u_2)) \\ + p(u_1) p'(u_2) - p(u_2) p'(u_1) = 0 \end{aligned}$$

besteht oder

$$\begin{aligned} & (p'(u_1+u_2))^2 (p(u_1) - p(u_2))^2 \\ &= [p(u_1+u_2) (p'(u_1) - p'(u_2)) + p(u_1) p'(u_2) - p(u_2) p'(u_1)]^2 \\ &= 4 (p(u_1) - p(u_2))^2 (p(u_1+u_2) - p(\omega)) (p(u_1+u_2) - p(\omega')) \times \\ & \quad \times (p(u_1+u_2) - p(\omega')). \quad *) \end{aligned}$$

Setzt man anstatt u_1 und u_2 u und v , anstatt $p(u+v)$ S , so ist die entstehende Gleichung:

$$\begin{aligned} & (S(p'(u) - p'(v)) + p(u) p'(v) - p'(u) p(v))^2 - \\ & - 4 (p(u) - p(v))^2 (S - p(\omega)) (S - p(\omega')) (S - p(\omega')) = 0 \end{aligned}$$

für

$$S = p(u+v), \quad p(u), \quad p(v)$$

*) Formeln und Lehrsätze § 12, Formel 14.

identisch erfüllt, indem $\varphi(u, u_1, u_2)$ auch für $u = u_1, u_2$ verschwindet. Daher kann man die angeschriebene ganze Function von S gleich

$$-4(p(u) - p(v))^2(S - p(u + v))(S - p(u))(S - p(v))$$

setzen, und nun gibt der Vergleich der Coefficienten von S^2 die Gleichung:

$$4(p(u) - p(v))^2(p(u) + p(v) + p(u + v)) + (p'(u) - p'(v))^2 =$$

$$= 4(p(u) - p(v))^2(p(u) + p(v) + p(u + v))$$

oder

$$p(u + v) = \frac{1}{4} \left(\frac{p'(u) - p'(v)}{p(u) - p(v)} \right)^2 - (p(u) + p(v)).$$

Darnach ist

$$p(u - v) = \frac{1}{4} \left(\frac{p'(u) + p'(v)}{p(u) - p(v)} \right)^2 - (p(u) + p(v))$$

und

$$p(u + v) - p(u - v) = - \frac{p'(u)p'(v)}{(p(u) - p(v))^2}.$$

Wir sehen also, daß $p(u + v)$ eine rationale Function von $p(u)$, $p(v)$, $p'(u)$, $p'(v)$ und dann nach Elimination von $p'(u)$ und $p'(v)$ auch eine algebraische Function von $p(u)$ und $p(v)$ wird.

Aber nicht allein die doppeltperiodische Function $p(u)$, sondern jede andere $\varphi(u)$ mit der einzigen wesentlich singulären Stelle $u = \infty$ hat ein algebraisches Additionstheorem, denn wenn

$$\varphi(u) = R(p(u), p'(u)), \quad \varphi(v) = R(p(v), p'(v)),$$

$$\varphi(u + v) = R(p(u + v), p'(u + v)) = R_1(p(u), p(v), p'(u), p'(v))$$

ist, so kann man mit Rücksicht auf die Gleichungen

$$(p'(u))^2 = 4p^3(u) - g_2 p(u) - g_3$$

$$(p'(v))^2 = 4p^3(v) - g_2 p(v) - g_3$$

eine algebraische Gleichung

$$G(\varphi(u + v), \varphi(u), \varphi(v)) = 0$$

für $\varphi(u + v)$ ableiten, deren Coefficienten rationale Functionen von $\varphi(u)$ und $\varphi(v)$ sind. Man nennt die doppeltperiodischen Functionen, welche im Endlichen vom Charakter der rationalen Functionen sind, *elliptische Functionen*; diese haben also ein Additionstheorem.

Sollte man umgekehrt $x = p(u)$, $y = p'(u)$ auch rational durch $\xi = \varphi(u)$, $\eta = \varphi'(u)$ darstellen können, dann erhält das Additionstheorem für die Functionen $\varphi(u)$ dieselbe Gestalt wie das der Function $p(u)$, denn

$$\varphi(u + v) = R_1(p(u), p(v), p'(u), p'(v))$$

wird eine rationale Function von $\varphi(u)$, $\varphi(v)$ und den ersten Ableitungen $\varphi'(u)$, $\varphi'(v)$.

Nun wissen wir, daß eine Transformation der algebraischen Gleichung

$$g(x, y) = y^2 - 4x^3 + g_2x + g_3 = 0$$

in

$$G(\xi, \eta) = 0$$

mit Hilfe rationaler Functionen

$$\xi = R_1(x, y), \quad \eta = R_2(x, y)$$

umkehrbar ist, wenn G nicht die Potenz einer irreductiblen ganzen Function, sondern selbst eine irreductible Function ist; wenn also wenigstens einem festen Werthe von $\xi = \varphi(u)$ solche Werthepaare x und y zugehören, daß die entsprechenden η -Werthe verschieden ausfallen.

Gibt man also u einen bestimmten Werth, berechnet dann $\varphi(u) = \xi$ und die hierzu gehörigen Werthepaare (x, y) oder

$$(p(u), p'(u)) = (a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots (a_r, b_r),$$

so müssen zur eindeutigen Umkehrung der Transformation den aus den Gleichungen

$$p(u) - a_\varrho = 0, \quad p'(u) - b_\varrho = 0 \quad (\varrho = 1, 2, \dots r)$$

hervorgehenden Werthen

$$u = u_1 + w, u_2 + w, \dots u_r + w$$

wohl gleiche Functionswerthe $\varphi(u)$, aber ungleiche Werthe für $\varphi'(u)$ entsprechen.

Zunächst ist klar, daß einem Werthepaare a_ϱ, b_ϱ nur ein einziger bis auf Perioden bestimmter Werth von u zugehört, denn die der Gleichung

$$p(u) - a_\varrho = 0$$

genügenden u -Werthe sind aus einem ersten u_ϱ in folgender Weise gebildet; es ist

$$u = \pm u_\varrho + w.$$

Weil aber $p'(-u) = -p'(u)$ ist, kann nicht gleichzeitig

$$p'(u_\varrho) - b_\varrho = 0 \quad \text{und} \quad -p'(u_\varrho) - b_\varrho = 0$$

sein, es müßte denn $u_\varrho \equiv \omega, \omega'', \omega'$ und $a_\varrho = e_1$ und $b_\varrho = 0$ sein, was im Allgemeinen nicht eintreten wird.

Den r verschiedenen Werthepaaren (a_ϱ, b_ϱ) entsprechen somit r incongruente Werthe u_ϱ , und diesen sollen nun auch r verschiedene Werthepaare $\varphi(u_\varrho) = \xi, \varphi'(u_\varrho) = \eta$ zugehören, oder weil

$$\varphi(u_1) = \varphi(u_2) = \dots = \varphi(u_r)$$

sein wird, sollen

$$\varphi'(u_1), \varphi'(u_2), \dots \varphi'(u_r)$$

verschieden ausfallen.

Nehmen wir an, daß

$$\varphi(u_\varrho) = \varphi(u_\pi) \quad \text{und} \quad \varphi'(u_\varrho) = \varphi'(u_\pi)$$

ist, so werden auch alle höheren Ableitungen von φ an den Stellen u_ϱ und u_π dieselben Werthe erhalten, denn es ist ja

$$\varphi'' = -\frac{\frac{\partial G}{\partial \varphi}}{\frac{\partial G}{\partial \varphi_1}} \varphi' = \frac{G_1}{\frac{\partial G}{\partial \varphi}}, \quad \varphi''' = \frac{G_2}{\left(\frac{\partial G}{\partial \varphi}\right)^2}, \dots$$

wo G_1, G_2 usw. ganze Functionen von φ und φ' sind. Dann werden aber in hinlänglich kleiner Umgebung von u_ϱ und u_π die Entwicklungen von $\varphi(u_\varrho + h)$ und $\varphi(u_\pi + h)$ übereinstimmen, d. h. es besteht auch die Gleichung

$$\varphi(u_\varrho + h) = \varphi(u_\pi + h)$$

oder

$$\varphi(h) = \varphi(u_\varrho - u_\pi + h),$$

und $u_\varrho - u_\pi$ wird eine Periode der Function $\varphi(u)$.

Bezeichnet demnach $(2\omega, 2\omega')$ ein primitives Periodenpaar der Functionen $p(u)$ und $\varphi(u)$, so kann $\varphi'(u_\varrho)$ nicht gleich $\varphi'(u_\pi)$ sein — ausser an einzelnen Ausnahmestellen, wo $\frac{\partial G}{\partial \varphi}$ verschwindet — und man kann umgekehrt $p(u)$ und $p'(u)$ rational durch $\varphi(u)$ und $\varphi'(u)$ ausdrücken.

Wir sind damit bei dem Satze angelangt, daß jede eindeutige doppeltperiodische Function $\varphi(u)$, die im Endlichen den Charakter der rationalen Function aufweist, auch ein Additionstheorem der Gestalt:

$$\varphi(u+v) = R(\varphi(u), \varphi(v), \varphi'(u), \varphi'(v))$$

besitzt.

Betrachtet man die algebraische Gleichung:

$$G(\varphi(u+v), \varphi(u), \varphi(v)) = 0$$

und fragt nach denjenigen Functionen φ , welche eine derartige Functionalgleichung erfüllen, so erhält man gewifs noch allgemeinere Functionen als die eben genannten eindeutigen doppeltperiodischen Functionen, denn man kann der gegebenen Gleichung zufolge $\varphi(u+v)$ als algebraische Function von $\varphi(u), \varphi(v), \varphi'(u), \varphi'(v)$ entwickeln. Die Differentiation der Gleichung nach u und v führt auf die Relationen:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial \varphi(u)} \varphi'(u) + \frac{\partial G}{\partial \varphi(u+v)} \frac{\partial \varphi(u+v)}{\partial u} &= 0 \\ \frac{\partial G}{\partial \varphi(v)} \varphi'(v) + \frac{\partial G}{\partial \varphi(u+v)} \frac{\partial \varphi(u+v)}{\partial v} &= 0 \end{aligned}$$

und durch Subtraction erhält man

$$\frac{\partial G}{\partial \varphi(u)} \varphi'(u) - \frac{\partial G}{\partial \varphi(v)} \varphi'(v) = 0.$$

Nun aber kann man $\varphi(u+v)$ in der verlangten Weise darstellen.

Andrerseits läßt sich zeigen, daß jede analytische Function $\varphi(u)$, welche ein algebraisches Additionstheorem

$$G(\varphi(u+v), \varphi(u), \varphi(v)) = 0$$

besitzt, entweder eine algebraische Function von u , oder $e^{\frac{2\pi i u}{2\omega}}$ oder $p(u)$ ist. *)

M. Phragmen beweist ausführlich **), daß jede analytische Function $\varphi(u)$, deren Elemente

$$\mathfrak{P}_1(u|a), \quad \mathfrak{P}_1(v|b), \quad \mathfrak{P}(u+v|a+b)$$

die Relation

$$G(\mathfrak{P}_1(u|a), \mathfrak{P}_2(v|b), \mathfrak{P}(u+v|a+b)) = 0$$

erfüllen, in jedem endlichen Bereiche von dem Charakter einer algebraischen Function sein muß, die einer Gleichung entspringt, in welcher die Coefficienten im Endlichen keine wesentlich singulären Stellen haben, und zeigt, daß zwischen den zu den Argumentswerthen $u, v, u+v$ gehörigen Functionalwerthen $\varphi(u), \varphi(v), \varphi(u+v)$ immer dieselbe Relation bestehen muß.

Ist die Stelle $u = \infty$ eine wesentlich singuläre Stelle und $\varphi(u)$ eine endlich vieldeutige transcendente Function, so muß sie nothwendig periodisch sein. Ist nämlich die Gleichung $G = 0$ in $\varphi(u+v)$ vom m^{ten} Grade, so gibt es immer Werthe a , welche $\varphi(v)$ an $(m+1)$ Stellen $v_1, v_2, \dots v_{m+1}$ annimmt, und dann hat die Gleichung $G = 0$ bei jedem Werthe von u mehr verschiedene Wurzeln als ihr Grad anzeigt. Es müssen daher unter den Wurzeln:

$$\varphi(u+v_1), \quad \varphi(u+v_2), \dots \varphi(u+v_{m+1}) \quad (\mu = 1, 2, \dots m)$$

gleiche vorkommen; aber die Gleichung

$$\varphi_\mu(u+v_\mu) = \varphi(u+v_\nu)$$

verräth, daß $v_\mu - v_\nu$ eine Periode ist.

Lassen sich alle Perioden als ganzzahlige Vielfache einer einzigen 2ω ausdrücken, so ist $\varphi(u)$ eine endlich vieldeutige einfach periodische Function, und zwar eine algebraische Function von $e^{\frac{2\pi i u}{2\omega}}$.

Außer diesen gibt es noch doppeltperiodische Functionen, die der hier behandelten Classe angehören, wenn sie eindeutig sein sollen. —

Ist nunmehr eine algebraische Gleichung

$$G(\eta, \xi) = 0$$

vorgelegt, die man mit Hilfe der rationalen Substitutionen

$$x = R_1(\xi, \eta), \quad y = R_2(\xi, \eta)$$

*) Formeln und Lehrsätze § 1.

**) Acta mathematica Bd. 7, S. 33.

in die Gleichung

$$y^2 = 4x^3 - g_2x - g_3$$

umwandeln kann, dann darf man ξ und η als doppeltperiodische Functionen $\varphi(u)$ und $\varphi'(u)$ eines Parameters u auffassen und die Perioden von $\varphi(u)$ und $\varphi'(u)$ sind diejenigen, welche der durch die Differentialgleichung:

$$y^2 = \left(\frac{dx}{du}\right)^2 = 4x^3 - g_2x - g_3$$

definirten Function $x = p(u)$, die für $u=0$ unendlich wird, zukommen.

Die Gleichung $G(\xi, \eta) = 0$ kann nur vom ersten Range sein, denn es gibt ja rationale Functionen von ξ und η , die nur an einer Stelle u des Periodenparallelogramms und nur an einer Stelle (ξ, η) von der zweiten Ordnung unendlich werden. Umgekehrt sieht man, daß die algebraischen Gleichungen ersten Ranges mit Hilfe der eindeutigen doppeltperiodischen Functionen zu discutiren sind.

§ 62. Berechnung primitiver Perioden.

Nun handelt es sich aber um die Berechnung primitiver Perioden der durch die Differentialgleichung

$$\left(\frac{dx}{du}\right)^2 = 4x^3 - g_2x - g_3$$

definirten doppeltperiodischen Function $x = p(u)$.

Da die Gleichung

$$p(u+v) - p(u-v) = -\frac{p'(u)p'(v)}{(p(u)-p(v))^2}$$

besteht und andererseits für jede Periode ω die Differenz

$$p(u+\omega) - p(u-\omega)$$

verschwindet, so gehen die halben Perioden offenbar als Lösungen der Gleichung

$$p(v) = 0 \quad \text{oder} \quad p'(v) = 0$$

hervor. Indem aber die zuerst genannten Werthe v zu keiner neuen Definition der Perioden führen, brauchen wir nur diejenigen Werthe v zu suchen, für welche

$$(p'(v))^2 = 4(p(v) - e_1)(p(v) - e_2)(p(v) - e_3)$$

verschwindet.

Bedeutet hier e_1 den Werth, welchen die Function für $v = \omega + w$, e_3 den Werth, den $p(v)$ für $v = \omega' + w$ annimmt, so ist e_2 der Werth, den $p(v)$ an den Stellen $v = \omega + \omega' + w = \omega'' + w$ erhält.

Angenommen, man habe aus der Differentialgleichung

$$\left(\frac{du}{dx}\right)^2 = \frac{1}{4(x-e_1)(x-e_2)(x-e_3)} \quad (x = \infty, u = 0)$$

irgend zwei u -Werthe $\omega_1 = \omega + w$ und $\omega_3 = \omega' + 2w$ ermittelt, für

die x gleich e_1 respective e_3 wird, so muß man hinterher nachsehen, wie die einmal fixirten halben Perioden mit primitiven zusammenhängen oder ob sie selbst halbe primitive Perioden sind.

Ist $(2\omega, 2\omega')$ ein primitives Periodenpaar und soll auch $(2\omega_1, 2\omega_3)$ ein solches sein, so müssen die Beziehungen bestehen:

$$\omega_1 = p\omega + q\omega' = \omega + \omega$$

$$\omega_3 = p'\omega + q'\omega' = \omega' + \omega,$$

wo die ganzen Zahlen p und q oder p' und q' nicht gleichzeitig gerade sein dürfen, indem sonst $p(\omega_1)$ oder $p(\omega_3)$ nicht gleich e_1 oder e_3 wäre. Weil

$$\frac{\sigma'(u+2\omega_1)}{\sigma(u+2\omega_1)} = \frac{\sigma'(u)}{\sigma(u)} + 2p\eta + 2q\eta', \quad \frac{\sigma'(u+2\omega_3)}{\sigma(u+2\omega_3)} = \frac{\sigma'(u)}{\sigma(u)} + 2p'\eta + 2q'\eta'$$

und

$$\frac{\sigma'(\omega_1)}{\sigma(\omega_1)} = p\eta + q\eta' = \eta_1, \quad \frac{\sigma'(\omega_3)}{\sigma(\omega_3)} = p'\eta + q'\eta' = \eta_3$$

ist, wird

$$\eta_1\omega_3 - \eta_3\omega_1 = (\eta\omega' - \eta'\omega)(pq' - p'q),$$

und nachdem

$$\eta\omega' - \eta'\omega = \pm \frac{\pi i}{2}$$

ist, muß

$$\eta_1\omega_3 - \eta_3\omega_1 = \pm \frac{\pi i}{2}, \quad pq' - p'q = \pm 1$$

sein, denn andernfalls könnte man 2ω und $2\omega'$ nicht ganzzahlig durch $2\omega_1$ und $2\omega_3$ ausdrücken.

Man hat demnach zum Beweise, daß die einmal gewonnenen halben Perioden $2\omega_1, 2\omega_3$ primitive sind, zu zeigen, daß $\eta_1\omega_3 - \eta_3\omega_1 = \pm \frac{\pi i}{2}$ wird. —

Vor der Bestimmung irgend welcher halber Perioden bemerken wir zunächst, daß die unendlich vieldeutige Function u von x nirgends unendlich wird.

Da das durch die Gleichung

$$y^2 = 4x^3 - g_2x - g_3 = 4(x - e_1)(x - e_2)(x - e_3) = R(x)$$

definierte algebraische Gebilde in der Umgebung jeder endlichen, von $(x = e_2$ und $y = 0)$ verschiedenen Stelle $x = a$, $y = b$ in der Form:

$$x = a + t, \quad y = b(1 + t^2\mathfrak{P}(t))$$

in der Umgebung von $(e_2, 0)$ durch ein Functionenpaar

$$x = e_2 + \frac{t^2}{R'(e_2)} = e_2 + \frac{t^2}{12e_2^2 - g_2}, \quad y = t(1 + t^2\mathfrak{P}(t^2))$$

und in der Umgebung der unendlich fernen Stelle (∞, ∞) in der Gestalt

$$x = \frac{t^{-2}}{4}, \quad y = \frac{t^{-3}}{4}(1 + t^2\mathfrak{P}(t^2))$$

darstellbar ist, so wird die Function, deren Ableitung nach $t \left(\frac{dx}{\frac{dt}{y}} \right)$ ist, nirgends unendlich.

Bezeichnet $F(x, y)$ irgend eine rationale Function von x und y und stellt man das Differential $F(x, y)dx$ in der Umgebung einer Stelle (x, y) in der Form $\mathfrak{P}(t)dt$ dar, so heisst die Differenz der Werthe derjenigen Function von t , deren Differential $\mathfrak{P}(t)dt$ ist, für zwei Stellen t_2 und t_1 des hier benutzten Elementes des algebraischen Gebildes das von t_1 nach t_2 erstreckte *bestimmte Integral*:

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathfrak{P}(t) dt.$$

Entsprechen den Werthen $t = t_1, t_2$ die Stellen (x_1, y_1) und (x_2, y_2) , so schreibt man das Integral auch in der Form

$$\int_{(x_1, y_1)}^{(x_2, y_2)} F(x, y) dx.$$

Will man ein Integral von (x_0, y_0) nach einer einem zweiten Functionen-element angehörigen Stelle (x_0', y_0') erstrecken, so suche man einen von (x_0, y_0) nach (x_0', y_0') verlaufenden continuirlichen Weg mit den vermittelnden Stellen

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots (x_n, y_n)$$

und verstehe unter dem bestimmten Integral

$$\int_{(x_0, y_0)}^{(x_0', y_0')} F(xy) dx \quad \text{die Summe} \quad \sum_{v=0}^n \int_{(x_v, y_v)}^{(x_{v+1}, y_{v+1})} F(xy) dx,$$

wobei (x_{n+1}, y_{n+1}) für (x_0', y_0') gesetzt ist. Mit der Wahl des von (x_0, y_0) nach (x_0', y_0') sich erstreckenden Weges hat das *bestimmte Integral* $\int_{(x_0, y_0)}^{(x_0', y_0')} F(xy) dx$ auch einen bestimmten Werth.

Nach diesen Bemerkungen wird das bestimmte Integral $\int_{(x_0, y_0)}^{(x_0', y_0')} \frac{dx}{y}$ nirgends unendlich.

Wir denken nunmehr die von einander verschiedenen Wurzeln der Gleichung

$$4x^3 - g_2x - g_3 = 0$$

e_1, e_2, e_3 mit Rücksicht auf die Beziehung $e_1 + e_2 + e_3 = 0$ so geordnet, daß $e_1 - e_2, e_2 - e_3$ und dann auch $e_1 - e_3$ positiv werden, d. h. positive reelle Bestandtheile oder — falls diese verschwinden — doch positive imaginäre Bestandtheile besitzen. Dann kann keine der Gröfsen

$$\frac{e_2 - e_3}{e_1 - e_3} = \kappa^2 \quad \text{und} \quad \frac{e_1 - e_2}{e_1 - e_3} = \kappa'^2$$

einen reellen negativen Werth annehmen und keine hat einen reellen positiven Werth, der gröfser oder gleich 1 ist.

Nach dieser Festsetzung fragen wir, ob es u Werthe gibt, für die $p(u) = e_1$ ist.

Sind e_1, e_2, e_3 und dann auch g_2 und g_3 reell, so wird x in der Umgebung von $u=0$ bei reellen zunehmenden u -Werthen abnehmen, und indem wir uns an diesen einfachen Fall halten, setzen wir

$$\frac{du}{dx} = -\frac{1}{\sqrt{4(x-e_1)(x-e_2)(x-e_3)}}$$

und geben hierin der Wurzel das positive Zeichen. Da dem Werthe $x = \infty$ der Werth $u = 0$ zugehört, ist bei positiv genommener Quadratwurzel:

$$\int_0^u du = u = -\int_{\infty}^x \frac{dx}{\sqrt{R(x)}} = \int_x^{\infty} \frac{dx}{\sqrt{R(x)}}$$

und

$$\omega_1 = \int_{e_1}^{\infty} \frac{dx}{\sqrt{R(x)}}$$

wird ein u -Werth, der die Gleichung $p(u) - e_1 = 0$ erfüllt. —

Setzt man $x = e_1 + \xi$ und versteht unter ξ eine reelle Gröfse, so entspricht $x = e_1$ und $x = \infty$ der Werth $\xi = 0$ und $\xi = \infty$ und man kann

$$\omega_1 = \int_0^{\infty} \frac{d\xi}{2\sqrt{\xi} \sqrt{\xi+e_1-e_2} \sqrt{\xi+e_1-e_3}}$$

setzen. Legt man hier $\sqrt{\xi}$ das positive Zeichen bei, so hat man die zwei übrigen Wurzeln so zu wählen, dafs der reelle Theil derselben positiv ist.

Um auch einen Werth für ω_3 zu finden, setze man für u vi und bemerke, dafs die Entwicklung von $p(vi)$ in der Umgebung der Stelle $v = 0$ mit $-\frac{1}{v_2}$ beginnt. Dann geht $p(vi)$ auf dem Wege von $v=0$ nach $\frac{\omega_2}{i}$, von $-\infty$ nach e_3 , und weil $p'(u) = p'(vi)$ bei reellen v gleich ist einer negativ reellen Gröfse mal i , so setze man in der Gleichung

$$dv = \frac{dx}{\sqrt{-R(x)}}$$

die Quadratwurzel positiv, dann wird

$$\omega_3 = i \int_{-\infty}^{\frac{\omega_2}{i}} \frac{dx}{\sqrt{-R(x)}} = \int_{e_3}^{\infty} \frac{dx}{\sqrt{R(x)}}.$$

Die Substitution $x = e_3 - \xi$ führt wieder auf das geradlinig zu nehmende Integral:

$$\omega_3 = i \int_0^{\infty} \frac{d\xi}{2\sqrt{\xi} \sqrt{\xi + (e_1 - e_2)} \sqrt{\xi + (e_1 - e_3)}},$$

in welchem $\sqrt{\xi}$ der positive Werth beigelegt werden muß und die übrigen Wurzeln derart zu wählen sind, daß ihr reeller Theil positiv ist.

Bevor wir die gefundenen Werthe ω_1 und ω_3 in anderer Form darstellen, bemerken wir, daß die Function $p(u)$ für

$$u = \varpi = p\omega + q\omega'$$

gleich e_1, e_2, e_3 ist, je nachdem die Zahlen p und q (die nicht gleichzeitig gerade sind) den Bedingungen

$$p \equiv 1, \quad q \equiv 0 \pmod{2}$$

oder

$$p \equiv 1, \quad q \equiv 1 \pmod{2}$$

oder

$$p \equiv 0, \quad q \equiv 1 \pmod{2}$$

genügen, und daß die Gleichung

$$p(u \pm \varpi) - e_2 = \frac{1}{4} \left(\frac{p'(u)}{p(u) - e_2} \right)^2 - p(u) - 2e_2$$

mit Rücksicht auf die Formeln:

$$(p'(u))^2 = 4(p(u) - e_1)(p(u) - e_2)(p(u) - e_3) \\ e_1 + e_2 + e_3 = 0$$

in die folgende umzusetzen ist:

$$p(u \pm \varpi) - e_2 = \frac{(e_1 - e_2)(e_2 - e_3)}{p(u) - e_2}.$$

Setzt man nun an Stelle des früheren u $\omega_3 + u_1$ und läßt u_1 von 0 geradlinig nach ω_1 gehen, so wird

$$p(u) = p(u_1 + \omega_3) = e_3 + \frac{(e_1 - e_2)(e_2 - e_3)}{p(u) - e_3}$$

von e_3 nach e_2 übergehen, und wegen des vorhin negativ genommenen $p'(u_1)$ ist

$$p'(u) = p'(u_1 + \omega_3) = - \frac{(e_1 - e_2)(e_2 - e_3)}{(p(u_1) - e_3)^2} p'(u_1)$$

gleichzeitig positiv zu nehmen. Da u jetzt von ω_3 nach ω_2 geht, erhält man

$$\int_{\omega_3}^{\omega_2} du = \int_0^{\omega_1} du = \omega_1 = \int_0^{\infty} \frac{dx}{\sqrt{R(x)}} = \int_0^{\infty} \frac{dx}{\sqrt{R(x)}}.$$

Ersetzt man das frühere v durch $\omega_1 + v_1 i$ und geht v_1 von Null nach $\frac{\omega_2}{i}$ über, wobei

$$p(v) = p(v_1 i + \omega_1) = e_1 + \frac{(e_1 - e_2)(e_1 - e_3)}{p(v i) - e_1}$$

von e_1 nach e_2 gelangt und

$$p'(v) = p'(vi + \omega_1) = -\frac{(e_1 - e_2)(e_1 - e_3)}{(p(vi) - e_1)^2} p'(vi)$$

einer positiven Gröfse mal i gleich zu setzen ist, so kann man ω_3 in der Form:

$$\omega_3 = i \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{\sqrt{-R(x)}} = i \int_{e_1}^{e_2} \frac{dx}{\sqrt{-R(x)}}$$

schreiben. —

Eine andere gebräuchliche Form für die halben Perioden findet man durch die folgenden Erwägungen.

Es war

$$p(u) - p(v) = \frac{\sigma(v+u) \sigma(v-u)}{\sigma^2(u) \sigma^2(v)}.$$

Wenn hierin v eine halbe Periode ω ist, für die $p(\omega) = e_2$ sei, so erhält man

$$p(u) - e_2 = \frac{\sigma(\omega+u) \sigma(\omega-u)}{\sigma^2(u) \sigma^2(\omega)}.$$

Wird wie früher $\eta = \frac{\sigma'(\omega)}{\sigma(\omega)}$ gesetzt und führt man die Bezeichnung ein:

$$\sigma_2(u) = \frac{e^{-\eta u} \sigma(\omega+u)}{\sigma(\omega)} = \frac{e^{\eta u} \sigma(\omega-u)}{\sigma(\omega)},$$

so folgt die Gleichung

$$p(u) - e_2 = \left(\frac{\sigma_2(u)}{\sigma(u)} \right)^2 \quad (\lambda = 1, 2, 3).$$

Zwischen den neuen ganzen Functionen $\sigma_2(u)$, die an der Stelle $u=0$ den Werth 1 annehmen, bestehen die Relationen:

$$\sigma_1^2(u) - \sigma_2^2(u) + (e_1 - e_2) \sigma^2(u) = 0$$

$$\sigma_2^2(u) - \sigma_3^2(u) + (e_2 - e_3) \sigma^2(u) = 0$$

$$\sigma_3^2(u) - \sigma_1^2(u) + (e_3 - e_1) \sigma^2(u) = 0,$$

die man einfach durch Elimination von $p(u)$ erhält. Setzt man die Identität

$$(p(u) - e_1)(e_2 - e_3) + (p(u) - e_2)(e_3 - e_1) + (p(u) - e_3)(e_1 - e_2) = 0$$

in eine zwischen den Functionen $\sigma_2(u)$ um, so ergibt sich:

$$\sigma_1^2(u)(e_2 - e_3) + \sigma_2^2(u)(e_3 - e_1) + \sigma_3^2(u)(e_1 - e_2) = 0.$$

Diese Relationen benutze man zur Ableitung der Differentialgleichungen, welchen die zwölf Quotienten

$$\frac{\sigma_2(u)}{\sigma(u)} = \xi_{2,0}, \quad \frac{\sigma_\mu(u)}{\sigma_\nu(u)} = \xi_{\mu,\nu}, \quad \frac{\sigma(u)}{\sigma_2(u)} = \xi_{0,2}$$

genügen. Zunächst ist

$$(p'(u))^2 = 4 \left(\frac{\sigma_2(u) \sigma_\mu(u) \sigma_\nu(u)}{\sigma^3(u)} \right)^2 = 4 \xi_{2,0}^2 \xi_{\mu,0}^2 \xi_{\nu,0}^2.$$

Doch weil

$$\left(\frac{d}{du} (p(u) - e_2) \right)^2 = 4 \xi_{2,0}^2 \left(\frac{d \xi_{2,0}}{du} \right)^2$$

ist, erhält man

$$\left(\frac{d\xi_{\lambda 0}}{du}\right)^2 = \xi_{\mu 0}^2 \xi_{\nu 0}^2$$

und ferner

$$\frac{d\xi_{\lambda 0}}{du} = -\xi_{\mu 0}\xi_{\nu 0},$$

denn $\xi_{\lambda 0}$ wird an der Stelle $u=0$ unendlich und nimmt von da an ab; offenbar ist auch $\lim_{\xi_{\lambda 0}^2} \frac{d\xi_{\lambda 0}}{du} \frac{1}{\xi_{\lambda 0}^2} = -1$.

Da nach den früheren Gleichungen

$$\xi_{10}^2 - \xi_{20}^2 + (e_1 - e_2) = 0, \quad \xi_{20}^2 - \xi_{30}^2 + (e_2 - e_3) = 0, \quad \xi_{30}^2 - \xi_{10}^2 + (e_3 - e_1) = 0$$

ist, wird

$$\left(\frac{d\xi_{\lambda 0}}{du}\right)^2 = \xi_{\mu 0}^2 \xi_{\nu 0}^2 = (\xi_{\lambda}^2 + e_2 - e_{\mu})(\xi_{\lambda}^2 + e_2 - e_{\nu}).$$

Ebenso geht die Gleichung

$$p'(u) = -2 \frac{\sigma_{\lambda}(u) \sigma_{\mu}(u) \sigma_{\nu}(u)}{\sigma^3(u)}$$

in die folgenden Differentialgleichungen über:

$$\frac{d\xi_{\mu\nu}}{du} = -(e_{\mu} - e_{\nu}) \xi_{\lambda} \xi_{0\nu} \quad \text{und} \quad \frac{d\xi_{0\lambda}}{du} = \xi_{\mu\lambda} \xi_{\nu\lambda},$$

und es ist für $u=0$

$$\xi_{\mu\nu} = 1, \quad \xi_{0\lambda} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{d\xi_{0\lambda}}{du} = 1.$$

Die Differentialgleichungen erhalten aber auch die nachstehende Form:

$$\left(\frac{d\xi_{\mu\nu}}{du}\right)^2 = (e_{\mu} - e_{\lambda})(1 - \xi_{\mu\nu}^2) \left(1 - \frac{e_{\nu} - e_{\lambda}}{e_{\mu} - e_{\lambda}} \xi_{\mu\nu}^2\right)$$

$$\left(\frac{d\xi_{0\lambda}}{du}\right)^2 = (1 - (e_{\mu} - e_{\lambda}) \xi_{0\lambda}^2) (1 - (e_{\nu} - e_{\lambda}) \xi_{0\lambda}^2)$$

und jetzt übersieht man unmittelbar, daß wegen der leicht zu verificirenden Relationen

$$\frac{(e_{\nu} - e_{\mu})(e_{\nu} - e_{\lambda})}{p(u) - e_{\nu}} + e_{\nu} = (e_{\nu} - e_{\lambda}) \xi_{\mu\nu}^2 + e_{\lambda} = (e_{\nu} - e_{\mu}) \xi_{\lambda\nu}^2 + e_{\mu} \quad (A)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{e_1 - e_3}} \int_0^1 \frac{d\xi_{12}}{\sqrt{1 - \xi_{12}^2} \sqrt{1 - x^2 \xi_{12}^2}} = \frac{K}{\sqrt{e_1 - e_3}}$$

und

$$\omega_2 = \frac{i}{\sqrt{e_1 - e_3}} \int_0^1 \frac{d\xi_{23}}{\sqrt{1 - \xi_{23}^2} \sqrt{1 - x^2 \xi_{23}^2}} = \frac{K'}{\sqrt{e_1 - e_3}}$$

wird, wo in den geradlinig auszuführenden Integralen K und K' die Wurzeln diejenigen Werthe besitzen, deren reelle Bestandtheile positiv sind und der Werth von $\sqrt{e_1 - e_3}$ beliebig zu fixiren ist. —

Will man beweisen, daß die hier angegebenen Werthe ω_1, ω_3 halbe *primitive* Perioden sind, so suche man zunächst aus der Gleichung:

$$d\left(\frac{\sigma'(u)}{\sigma(u)}\right) = -p(u)du = \frac{x dx}{\sqrt{R(x)}}$$

durch geeignete Integrationen $\eta_1 = \frac{\sigma'(\omega_1)}{\sigma(\omega_1)}$ und $\eta_3 = \frac{\sigma'(\omega_3)}{\sigma(\omega_3)}$ zu berechnen.*)

Das Integral $\int \frac{x dx}{\sqrt{R(x)}}$ wird an der einzigen Stelle $x = \infty$ unendlich, doch weil die bestimmten Integrale zur Ermittlung von η_1 und η_3 offenbar nach diesem Punkte zu erstrecken sind, wollen wir das Differential $\frac{x dx}{\sqrt{R(x)}}$ zunächst umgestalten.

Nehmen wir zu diesem Zwecke die viel verwendete Identität

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\sqrt{R(t)}}{(s-t)\sqrt{R(s)}} \right) - \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\sqrt{R(s)}}{(t-s)\sqrt{R(t)}} \right) = \frac{2(s-t)}{\sqrt{R(s)}\sqrt{R(t)}}$$

auf, die sich unter Anwendung der Formel:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\sqrt{R(x)}}{x-\alpha} \right) = \frac{1}{2} \frac{R'(x)}{(x-\alpha)\sqrt{R(x)}} - \frac{\sqrt{R(x)}}{(x-\alpha)^2}$$

leicht bestätigen läßt, führen die Differentiationen wirklich aus, multipliciren das Resultat mit $\sqrt{R(t)}$ und setzen dann an Stelle von s x und geben t den Werth e_v , so geht die erwünschte Gleichung:

$$\frac{1}{2} d \left(\frac{\sqrt{R(x)}}{x-e_v} \right) = \left(x - e_v - \frac{(e_v - e_\mu)(e_v - e_\mu)}{x - e_v} \right) \frac{dx}{\sqrt{R(x)}}$$

oder

$$\frac{x dx}{\sqrt{R(x)}} = \frac{1}{2} d \left(\frac{\sqrt{R(x)}}{x-e_v} \right) + e_v \frac{dx}{\sqrt{R(x)}} + \frac{(e_v - e_\mu)(e_v - e_\mu)}{x - e_v} \frac{dx}{\sqrt{R(x)}}$$

hervor.

Nun folgt aus der Gleichung (A)

$$x - e_v = \frac{e_v - e_\mu}{\xi_{\mu v}^2 - 1} = \frac{e_v - e_\lambda}{\xi_{\lambda v}^2 - 1}$$

und je nachdem man den ersten oder zweiten Ausdruck für $x - e_v$ benutzt, ergibt sich im Falle $\mu = 1, v = 2, \lambda = 3$

$$\begin{aligned} \frac{x dx}{\sqrt{R(x)}} &= \frac{1}{2} d \left(\frac{\sqrt{R(x)}}{x-e_2} \right) + \frac{e_1}{\sqrt{e_1-e_3}} \frac{d\xi_{12}}{\sqrt{1-\xi_{12}^2} \sqrt{1-\kappa^2 \xi_{12}^2}} \\ &\quad - \sqrt{e_1-e_3} \frac{(1-\kappa^2 \xi_{12}^2) d\xi_{12}}{\sqrt{1-\xi_{12}^2} \sqrt{1-\kappa^2 \xi_{12}^2}} \\ \frac{x dx}{\sqrt{R(x)}} &= \frac{1}{2} d \left(\frac{\sqrt{R(x)}}{x-e_2} \right) - \frac{ie_3}{\sqrt{e_1-e_3}} \frac{d\xi_{32}}{\sqrt{1-\xi_{32}^2} \sqrt{1-\kappa^2 \xi_{32}^2}} \\ &\quad - i \sqrt{e_1-e_3} \frac{(1-\kappa^2 \xi_{32}^2) d\xi_{32}}{\sqrt{1-\xi_{32}^2} \sqrt{1-\kappa^2 \xi_{32}^2}}, \end{aligned}$$

*) Vergl. die „Formeln“ S. 86. 87.

denn es ist

$$e_\nu + \frac{(e_\nu - e_\lambda)(e_\nu - e_\mu)}{x - e_\nu} = e_\mu + (e_\lambda - e_\mu) \left(1 - \frac{e_\lambda - e_\nu}{e_\lambda - e_\mu} \xi_{\mu\nu}^2 \right)$$

oder

$$e_\nu + \frac{(e_\nu - e_\lambda)(e_\nu - e_\mu)}{x - e_\nu} = e_\lambda + (e_\mu - e_\lambda) \left(1 - \frac{e_\mu - e_\nu}{e_\mu - e_\lambda} \xi_{\lambda\nu}^2 \right).$$

Da nun die Gleichung

$$\frac{\sigma'(u)}{\sigma(u)} = \int_0^x \frac{x dx}{V R(x)} = \frac{1}{2} \frac{V R(x)}{x - e_\nu} + e_\nu \int_0^x \frac{dx}{V R(x)} + \int_0^x \frac{(e_\nu - e_\lambda)(e_\nu - e_\mu)}{x - e_\nu} \frac{dx}{V R(x)}$$

in der Umgebung der unendlich fernen Stelle richtig ist, d. h. weil die Entwicklungen beider Seiten als Functionen von u in der Umgebung von $u = 0$ oder als Functionen von x in der Umgebung von $x = \infty$ übereinstimmen und somit auf keiner Seite eine Constante hinzuzufügen ist, folgt

$$\eta_1 = -\frac{e_1}{V e_1 - e_3} \int_0^1 \frac{d\xi_{12}}{\sqrt{1 - \xi_{12}^2} \sqrt{1 - x'^2 \xi_{12}^2}} + \sqrt{e_1 - e_3} \int_0^1 \frac{1 - x'^2 \xi_{12}^2}{\sqrt{1 - \xi_{12}^2} \sqrt{1 - x'^2 \xi_{12}^2}} d\xi_{12}$$

$$\eta_3 = -\frac{i e_3}{V e_1 - e_3} \int_0^1 \frac{d\xi_{32}}{\sqrt{1 - \xi_{32}^2} \sqrt{1 - x'^2 \xi_{32}^2}} - i \sqrt{e_1 - e_3} \int_0^1 \frac{1 - x'^2 \xi_{32}^2}{\sqrt{1 - \xi_{32}^2} \sqrt{1 - x'^2 \xi_{32}^2}} d\xi_{32}.$$

Denn wenn u von 0 bis ω_1 oder ω_3 übergeht, durchläuft ξ_{12} und ξ_{32} die Werthe von 1 bis 0 und x geht von ∞ bis e_1 oder von $-\infty$ bis e_3 . In den neuen, geradlinig zu nehmenden Integralen

$$E = \int_0^1 \frac{1 - x'^2 \xi_{12}^2}{\sqrt{1 - \xi_{12}^2} \sqrt{1 - x'^2 \xi_{12}^2}} d\xi_{12} \quad \text{und} \quad E' = \int_0^1 \frac{1 - x'^2 \xi_{32}^2}{\sqrt{1 - \xi_{32}^2} \sqrt{1 - x'^2 \xi_{32}^2}} d\xi_{32}$$

haben die Quadratwurzeln wieder diejenigen Werthe, deren reelle Bestandtheile positiv sind.

Setzt man

$$\eta_1 = -\frac{e_1 K}{V e_1 - e_3} + \sqrt{e_1 - e_3} E, \quad \eta_3 = -\frac{i e_3 K'}{V e_1 - e_3} - i \sqrt{e_1 - e_3} E'$$

und bemerkt, daß bei den getroffenen Festsetzungen

$$\Re\left(\frac{\omega_3}{\omega_1 i}\right) = \Re\left(\frac{K'}{K}\right)$$

positiv ist, so hat man endlich zum Beweise dafür, daß $2\omega_1$ und $2\omega_3$ primitive Perioden sind, zu zeigen, daß die Gleichung

$$\eta_1 \omega_3 - \eta_3 \omega_1 = i(EK' - KK' + E'K) = \frac{\pi i}{2}$$

besteht; doch gehen wir auf die Ausführung nicht ein und verweisen auf die Untersuchungen von Legendre.*)

Hier haben wir die verschiedenen Ausdrücke so gewählt, wie sie in den Formeln von Weierstrass angegeben sind.

*) Traité des fonctions elliptiques. I, S. 60. Siehe auch Darège: Theorie der elliptischen Functionen § 70.

§ 64. Eindeutige Functionen des Periodenverhältnisses.

Hat man zwei primitive Perioden $2\omega_1$ und $2\omega_3$ gefunden, für die

$$\Re\left(\frac{\omega_3}{\omega_1 i}\right) > 0, \quad p(\omega_1) = e_1, \quad p(\omega_2) = e_2, \quad p(\omega_3) = e_3$$

ist, so werden mit Hilfe der Gleichungen

$$\frac{\sigma_\lambda(u)}{\sigma(u)} = \sqrt{p(u) - e_\lambda} \quad (\lambda = 1, 2, 3),$$

die ihrerseits die Quadratwurzeln $\sqrt{p(u) - e_\lambda}$ als eindeutige Functionen von u definiren, die sechs Quadratwurzeln $\sqrt{e_\mu - e_\nu}$ in folgender Weise bestimmt sein:

$$\begin{aligned} \sqrt{e_1 - e_2} &= \frac{\sigma_2(\omega_1)}{\sigma(\omega_1)} = \frac{e^{\eta_1 \omega_1} \sigma(\omega_2)}{\sigma(\omega_1) \sigma(\omega_2)}, & \sqrt{e_2 - e_1} &= \frac{\sigma_1(\omega_2)}{\sigma(\omega_2)} = -\frac{e^{\eta_1 \omega_2} \sigma(\omega_3)}{\sigma(\omega_1) \sigma(\omega_2)}, \\ \sqrt{e_2 - e_3} &= \frac{\sigma_3(\omega_2)}{\sigma(\omega_2)} = -\frac{e^{\eta_2 \omega_2} \sigma(\omega_1)}{\sigma(\omega_2) \sigma(\omega_3)}, & \sqrt{e_3 - e_2} &= \frac{\sigma_2(\omega_3)}{\sigma(\omega_3)} = \frac{e^{\eta_2 \omega_3} \sigma(\omega_1)}{\sigma(\omega_2) \sigma(\omega_3)}, \\ \sqrt{e_3 - e_1} &= \frac{\sigma_1(\omega_3)}{\sigma(\omega_3)} = \frac{e^{-\eta_1 \omega_3} \sigma(\omega_2)}{\sigma(\omega_1) \sigma(\omega_3)}, & \sqrt{e_1 - e_3} &= \frac{\sigma_3(\omega_1)}{\sigma(\omega_1)} = \frac{e^{-\eta_1 \omega_1} \sigma(\omega_2)}{\sigma(\omega_1) \sigma(\omega_3)}, \end{aligned}$$

— was man mit Hilfe der Relation

$$\sigma(u + 2\omega) = (-1)^{p+q} e^{2\eta(u+\omega)} \sigma(u),$$

wo $\omega = p\omega_1 + q\omega_3$ ist, leicht bestätigen kann —, und zwischen ihnen bestehen die Beziehungen:

$$\begin{aligned} \sqrt{e_2 - e_1} &= -i\sqrt{e_1 - e_2}, & \sqrt{e_3 - e_1} &= -i\sqrt{e_1 - e_3}, \\ \sqrt{e_3 - e_2} &= -i\sqrt{e_2 - e_3}, \end{aligned}$$

weil $e^{\frac{\pi i}{2}} = i$ ist.

Für die Größen $\sigma(\omega_2)$ ergeben sich folgende Ausdrücke:

$$\begin{aligned} \sigma(\omega_1) &= \frac{e^{\frac{1}{2}\eta_1 \omega_1}}{\sqrt{e_1 - e_2} \sqrt{e_1 - e_3}}, & \sigma(\omega_2) &= \frac{\sqrt{i} e^{\frac{1}{2}\eta_2 \omega_2}}{\sqrt{e_1 - e_2} \sqrt{e_2 - e_3}}, \\ \sigma(\omega_3) &= \frac{ie^{\frac{1}{2}\eta_3 \omega_3}}{\sqrt{e_1 - e_3} \sqrt{e_2 - e_3}}, \end{aligned}$$

wenn \sqrt{i} für $e^{\frac{\pi i}{4}}$ gesetzt wird, und hierin haben die vierten Wurzeln nur solche Werthe, deren Quadrate den oben genannten Werthen gleich sind.

Da ferner

$$\frac{\sigma_2(\omega_1)}{\sigma_3(\omega_1)} = \kappa', \quad \frac{\sigma_1(\omega_3)}{\sigma_2(\omega_3)} = \frac{1}{\kappa}, \quad \frac{\sigma_1(\omega_2)}{\sigma_3(\omega_2)} = -i \frac{\kappa'}{\kappa}$$

ist, wird noch

$$\begin{aligned} \sqrt{e_2 - e_3} &= \kappa \sqrt{e_1 - e_3}, & \sqrt{e_3 - e_2} &= -i \kappa \sqrt{e_1 - e_3}, \\ \sqrt{e_1 - e_2} &= \kappa' \sqrt{e_1 - e_3}, & \sqrt{e_2 - e_1} &= -i \kappa' \sqrt{e_1 - e_3}. \end{aligned}$$

Sind $2\omega_1$ und $2\omega_3$ primitive Perioden der durch die Differentialgleichung

$$\left(\frac{dx}{du}\right)^2 = 4x^3 - g_2x - g_3 \quad (u=0, x=\infty)$$

definirten Function $x=p(u)$, die in der Umgebung der Stelle $u=0$ die Entwicklung

$$p(u) = \frac{1}{u^2} + \sum_{\nu=2}^{\infty} (2\nu-1)c_\nu u^{2\nu-2}$$

besitzt, wo

$$c_\nu = \sum_{\mu, \mu'} \frac{1}{(2\mu\omega_1 + 2\mu'\omega_3)^{2\nu}} \quad (\nu=2, 3, \dots)$$

ist, so ist klar, dass c_ν ungeändert bleibt, wenn man $2\omega_1$ und $2\omega_3$ durch äquivalente Perioden $2\varpi_1$ und $2\varpi_3$ ersetzt oder — was dasselbe heisst — wenn man ω_1 und ω_3 einer ganzzahligen Substitution:

$$\begin{aligned} \varpi_1 &= p\omega_1 + q\omega_3 \\ \varpi_3 &= p'\omega_1 + q'\omega_3 \end{aligned}$$

mit der Determinante $pq' - p'q = \pm 1$ unterwirft.

Die Ausdrücke c_ν sind, wie wir gleich nachweisen wollen, analytische Functionen von ω_1 und ω_3 *).

Bezeichnet man den Quotienten $\frac{\omega_3}{\omega_1}$ mit $\tau = \alpha + \beta i$, wo unter der Annahme eines positiven reellen Bestandtheiles $\Re\left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)$ α alle reellen und β nur positive reelle Werthe erhalten darf, auf dass

$$|e^{\pi i \tau}| < 1$$

ist, so kann man die unbedingt convergenten Summen in folgender Weise schreiben:

$$\begin{aligned} c_n &= \frac{1}{(2\omega_1)^{2n}} \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} \sum_{\mu'=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{\mu + \mu'\tau}\right)^{2n} = \\ &= \frac{1}{(2\omega_1)^{2n}} \left[\sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} \binom{1}{\mu}^{2n} + 2 \sum_{\mu=1}^{\infty} \sum_{\mu'=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{\mu + \mu'\tau}\right)^{2n} \right]. \end{aligned}$$

Leitet man aus der Formel

$$\pi \cotg \tau \mu' \pi = -\pi i \frac{1 + e^{2i\pi\tau\mu'}}{1 - e^{2i\pi\tau\mu'}}$$

oder aus der äquivalenten Gleichung:

$$\frac{1}{\tau\mu} + \sum_{\mu'=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\tau\mu' + \mu} + \frac{1}{\tau\mu' - \mu} \right\} = -i\pi - 2i\pi \sum_{\lambda=1}^{\infty} e^{2\pi i \tau \mu' \lambda}$$

*) Vergleiche Hurwitz: Theorie der elliptischen Modulfuctionen. Math. Annalen, Bd. 18.

durch $(2n)$ malige Differentiation nach $(\tau\mu')$ die Relation ab:

$$\sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{\tau\mu' + \mu} \right)^{2n} = (-1)^{2n} \frac{(2i\pi)^{2n}}{(2n-1)!} \sum_{\lambda=1}^{\infty} \lambda^{2n-1} e^{2\pi i \tau \mu' \lambda},$$

in welcher die rechte Seite convergirt, solange $|e^{2\pi i \tau \mu'}| < 1$, so gibt deren Anwendung die Formel:

$$c_n = \frac{2}{(2\omega_1)^{2n}} \left[\sum_{\mu=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\mu} \right)^{2n} + (-1)^n \frac{(2\pi)^{2n}}{(2n-1)!} \sum_{\lambda=1}^{\infty} \lambda^{2n-1} \frac{e^{2\pi i \tau \lambda}}{1 - e^{2\pi i \tau \lambda}} \right].$$

Der rechtsstehende Ausdruck ist der früheren Summe $\sum_{\mu'} \sum_{\mu} \left(\frac{1}{\mu\omega_1 + \mu'\omega_2} \right)^{2n}$ gleich, sofern nur $|e^{\tau\pi i}| < 1$ oder in $\tau = \alpha + \beta i$ β positiv ist. Er stellt eine analytische Function dar, denn die für den Klammerausdruck zu setzende Potenzreihe nach $e^{\tau\pi i}$ convergirt in der positiven Halbebene von τ , kann aber darüber hinaus nicht fortgesetzt werden, weil sie für jeden rationalen Werth von τ unendlich wird. Die Größen c_n sind also analytische Functionen von ω_1 und ω_2 .

Bei den oben genannten Substitutionen mit der Determinante $p'q' - p'q = 1$ wird zugleich mit $\Re\left(\frac{\omega_2}{\omega_1 i}\right)$ auch $\Re\left(\frac{\omega_2}{\omega_1 i}\right)$ positiv. Hat man demnach zwei eindeutige Functionen von ω_1 und ω_2 , die in der positiven Halbebene von τ nach Potenzen von $e^{\tau\pi i}$ zu entwickeln sind, und bei einer ganzzahligen linearen Substitution mit der positiven Determinante 1 um denselben Factor geändert werden, so ist deren Quotient eine eindeutige Function von τ , die nur in der positiven Halbebene existirt und bei den linearen Substitutionen

$$\tau' = \frac{\alpha + \beta\tau}{\gamma + \delta\tau} \quad (\alpha\delta - \beta\gamma = 1)$$

ungeändert bleibt.

Offenbar ist

$$\frac{g_2^3}{g_2^3 - 27g_3^2} = J(\tau)$$

eine solche Function, denn weil

$$g_2 = 60c_2, \quad g_3 = 140c_3$$

ist, fällt im Zähler und Nenner der bei einer der in Rede stehenden Substitutionen sich ändernde Factor $\left(\frac{1}{2\omega_1}\right)^{12}$ aus.

Da

$$\frac{g_2}{4} = -(e_1 e_2 + e_2 e_3 + e_3 e_1) = \frac{1}{2} (e_1^2 + e_2^2 + e_3^2)$$

ist, kann man

$$g_2 = \frac{4}{3} \left(1 - \frac{e_1^2}{e_1} - \frac{e_2^2}{e_2} + \left(\frac{e_2}{e_1} - \frac{e_3}{e_2} \right)^2 \right) (e_1 - e_3)^2 = \frac{4}{3} (1 - \kappa^2 + \kappa') (e_1 - e_3)^2$$

setzen, und weil

$$g_2^3 - 27g_3^2 = 16G = 16(e_3 - e_2)^2(e_2 - e_1)^2(e_1 - e_3)^2 \\ = 16(\kappa^2 \kappa'^2)^2(e_1 - e_3)^6$$

oder mit Rücksicht auf die Relation

$$\kappa^2 + \kappa'^2 = 1$$

gleich $16(\kappa^2(1 - \kappa^2))^2(e_1 - e_3)^6$ ist, läßt sich $J(\tau)$ als rationale Function von κ^2 darstellen:

$$J(\tau) = \frac{4}{27} \frac{(1 - \kappa^2 + \kappa^4)^3}{(\kappa^2(1 - \kappa^2))^2}$$

und κ^2 ist umgekehrt eine algebraische Function von $J(\tau)$.

Eine weitere wichtige Gleichung ist die nachstehende:

$$J(\tau) - 1 = \frac{27g_3^2}{g_2^3 - 27g_3^2} = \frac{((1 + \kappa^2)(2 - \kappa^2)(1 - 2\kappa^2))^2}{27(\kappa^2(1 - \kappa^2))^2}.$$

Es handelt sich nun wieder um eine Darstellung von $J(\tau)$. Es ist

$$g_2^3 = (60c_2)^3 = \left(\frac{1}{2\omega_1}\right)^{12} \left\{ 120 \sum_{\mu=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\mu}\right)^4 + 320\pi^4 \sum_{\lambda=1}^{\infty} \lambda^3 \frac{e^{2\pi i \tau \lambda}}{1 - e^{2\pi i \tau \lambda}} \right\}^3$$

und weil $\sum_{\mu=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\mu}\right)^4 = \frac{4}{120} \frac{\pi^4}{3}$ ist, gilt auch

$$g_2^3 = \left(\frac{\pi}{\omega_1}\right)^{12} \left\{ \frac{1}{12} + 20 \sum_{\lambda=1}^{\infty} \lambda^3 \frac{e^{2\pi i \tau \lambda}}{1 - e^{2\pi i \tau \lambda}} \right\}^3.$$

Um den Nenner $16G$ in dem Ausdrucke für $J(\tau)$ als Function von τ zu entwickeln, gehen wir zunächst auf die Relation

$$\frac{\sigma_1(u)}{\sigma(u)} = \sqrt{p(u) - c_1} = \frac{e^{-\eta_1 u} \sigma(\omega_1 + u)}{\sigma(\omega_1) \sigma(u)} = \frac{e^{\eta_1 u} \sigma(\omega_1 - u)}{\sigma(\omega_1) \sigma(u)}$$

zurück und stellen $\sigma(u)$ als Function von τ dar.

Setzt man in

$$\sigma(u) = e^{\frac{\eta_1 u^2}{2\omega_1}} \frac{2\omega_1}{\pi} \sin \frac{u\pi}{2\omega_1} \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 - \frac{\sin^2 \left(\frac{u\pi}{2\omega_1} \right)}{\sin^2 \left(\frac{n\omega_1 \pi}{\omega_1} \right)} \right)$$

statt der Sinuse die Exponentialfunction und benützt die Bezeichnung:

$$e^{\frac{u\pi i}{2\omega_1}} = z, \quad e^{\tau \pi i} = h,$$

so wird

$$\sigma(u) = e^{\frac{\eta_1 u^2}{2\omega_1}} \frac{2\omega_1}{\pi} \frac{z - \frac{1}{z}}{2i} \prod_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - h^{2n} z^2) \left(1 - \frac{h^{2n}}{z^2}\right)}{(1 - h^{2n})^2}$$

und hierin ist

$$\eta_1 = \frac{\pi^2}{2\omega_1} \left\{ \frac{1}{6} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin^2 \left(\frac{n\omega_1 \pi}{\omega_1} \right)} \right\} = \frac{\pi^2}{2\omega_1} \left\{ \frac{1}{6} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4h^{2n}}{(1 - h^{2n})^2} \right\}.$$

Gibt man hierauf u den Werth ω_1 , wobei $z = e^{\frac{\pi i}{2}} = i$ zu setzen ist, so folgt:

$$\sigma(\omega_1) = \frac{2\omega_1}{\pi} e^{\frac{1}{2}\eta_1\omega_1} \left(\frac{\prod_n (1 + h^{2n})}{\prod_n (1 - h^{2n})} \right)^2,$$

aber im Falle $u = \omega_3$ und $z = e^{\frac{\pi i}{2}} = h^{\frac{1}{2}}$ wird:

$$\sigma(\omega_3) = \frac{i}{2} e^{\frac{\eta_1\omega_3^2}{2\omega_1}} \frac{2\omega_1}{\pi} \frac{1-h}{h^{\frac{1}{2}}} \frac{\prod (1 - h^{2n+1})(1 - h^{2n-1})}{\prod (1 - h^{2n})^2},$$

oder weil

$$\frac{e^{\frac{\eta_1\omega_3^2}{2\omega_1}}}{h^{\frac{1}{2}}} = e^{\frac{\eta_1\omega_3^2}{2\omega_1} - \frac{\omega_3\pi i}{2\omega_1}} = e^{\frac{\eta_3\omega_3}{2} - \frac{\pi i\tau}{4}} = \frac{e^{\frac{\eta_3\omega_3}{2}}}{h^{\frac{1}{4}}},$$

ist, gilt auch die Formel

$$\sigma(\omega_3) = \frac{2\omega_1}{\pi} \frac{i}{2} \frac{e^{\frac{\eta_3\omega_3}{2}}}{h^{\frac{1}{4}}} \left(\frac{\prod (1 - h^{2n-1})}{\prod (1 - h^{2n})} \right)^2.$$

Endlich bei der Substitution $u = \omega_2$ und $z = e^{\frac{\omega_2\pi i}{2\omega_1}} = ih^{\frac{1}{2}}$ ergibt sich mit Rücksicht auf die Gleichung:

$$e^{\frac{\eta_1\omega_2^2}{2\omega_1}} h^{-\frac{1}{2}} = e^{\frac{\eta_2\omega_2}{2} + \frac{\pi i}{4}} h^{-\frac{1}{4}},$$

wenn wir statt $e^{\frac{\pi i}{4}}$ \sqrt{i} schreiben:

$$\sigma(\omega_2) = \frac{2\omega_1}{\pi} e^{\frac{\eta_2\omega_2}{2}} \frac{\sqrt{i}}{2h^{\frac{1}{4}}} \left(\frac{\prod (1 + h^{2n-1})}{\prod (1 - h^{2n})} \right)^2.$$

Nunmehr erhalten die auf Seite 403 angegebenen Wurzelgrößen

$$\sqrt{e_2 - e_3}, \quad \sqrt{e_1 - e_3}, \quad \sqrt{e_1 - e_2}$$

die folgenden Werthe:

$$\begin{aligned} \sqrt{e_2 - e_3} &= \frac{\pi}{2\omega_1} 4h^{\frac{1}{2}} \prod (1 - h^{2n})^2 \prod (1 + h^{2n})^4 \\ \sqrt{e_1 - e_3} &= \frac{\pi}{2\omega_1} \prod (1 - h^{2n})^2 \prod (1 + h^{2n-1})^4 \\ \sqrt{e_1 - e_2} &= \frac{\pi}{2\omega_1} \prod (1 - h^{2n})^2 \prod (1 - h^{2n-1})^4. \end{aligned}$$

Man sieht zunächst, daß die Größen $\kappa^2 = \frac{e_2 - e_3}{e_1 - e_3}$ und $\kappa'^2 = \frac{e_1 - e_2}{e_1 - e_3}$ eindeutige Functionen von τ werden, denn man erhält:

$$x^2 = 16h \left(\frac{\prod (1 + h^{2n})}{\prod (1 - h^{2n})} \right)^8, \quad x'^2 = \left(\frac{\prod (1 - h^{2n-1})}{\prod (1 + h^{2n-1})} \right)^8.$$

Andrerseits folgt mit der Bemerkung, daß

$$\prod (1 - h^{2n})(1 - h^{2n-1})(1 + h^{2n})(1 + h^{2n-1}) = \prod (1 - h^{2n})$$

ist, für

$$16G = 16(e_2 - e_3)^2(e_1 - e_3)^2(e_1 - e_2)^2$$

der Ausdruck

$$\left(\frac{\pi}{\omega_1} \right)^{12} h^2 \prod_{n=1}^{\infty} (1 - h^{2n})^{24}$$

und darum besteht die Formel:

$$J(\tau) = \frac{g_2^3}{g_3^3 - 27g_3^2} = \frac{\left(\frac{1}{12} + 20 \sum_{n=1}^{\infty} n^3 \frac{h^{2n}}{1 - h^{2n}} \right)^3}{h^2 \prod_{n=1}^{\infty} (1 - h^{2n})^{24}}.$$

An dieser Stelle erwähnen wir nur noch, daß die Function $J(\tau)$ für den Argumentwerth $\tau = \varrho = e^{\frac{2\pi i}{3}}$ und alle daraus durch die ganzzahligen Substitutionen mit der Determinante 1 hervorgehenden Werthe verschwindet, und andererseits $J(\tau) - 1$ für $\tau = i = e^{\frac{\pi i}{2}}$ und die durch dieselben Substitutionen entspringenden Werthe Null wird. Man kann nämlich zeigen, daß in

$$J(\tau) = \frac{g_2^3}{16G} \quad \text{und} \quad \frac{27g_3^2}{16G} = J(\tau) - 1$$

$g_2 = \frac{60}{(2\omega_1)^4} \sum_{\mu, \mu'} \left(\frac{1}{\mu + \mu' \tau} \right)^4$ für $\tau = \varrho$ und $g_3 = \frac{140}{(2\omega_1)^6} \sum_{\mu, \mu'} \left(\frac{1}{\mu + \mu' \tau} \right)^6$ für $\tau = i$ verschwindet, indess $16G$ an diesen Stellen endlich bleibt.

In der That, wenn man die Glieder der Summe für g_2 zu je dreien in folgender Weise zusammenfaßt:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\mu + \mu' \varrho} \right)^4 + \left(\frac{1}{-\mu' + (\mu - \mu') \varrho} \right)^4 + \left(\frac{1}{\mu' - \mu - \mu' \varrho} \right)^4 = \\ & \left(\frac{1}{\mu + \mu' \varrho} \right)^4 \left(1 + \frac{1}{\varrho} + \frac{1}{\varrho^2} \right), \end{aligned}$$

so ist die Summe offenbar Null. Ebenso kann man in der Summe für g_3 die zwei Glieder vereinigen:

$$\left(\frac{1}{\mu + \mu' i} \right)^6 \quad \text{und} \quad \left(\frac{1}{-\mu + \mu' i} \right)^6 = \frac{1}{i} \left(\frac{1}{\mu + \mu' i} \right)^6$$

und ihre Summe gleich

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu'} i \right)^2 \left\{ 1 + \frac{1}{i} + \frac{1}{i^2} + \frac{1}{i^3} \right\}$$

setzen; man sieht, daß g_3 an der Stelle $\tau = i$ verschwindet.

Setzt man endlich $\frac{\tau}{i} = \frac{\omega_1}{\omega_1 i} = \infty$, ohne daß ω_1 Null ist, so wird $J(\tau) = \infty$, denn dann verschwindet $16G$, aber

$$J(\tau) \cdot e^{2\pi i \tau}$$

hat für $\tau = i\infty$ einen endlichen von Null verschiedenen Werth, und die Stelle $\tau = i\infty$ ist für $J(\tau)$ eine wesentlich singuläre.

II. Abschnitt.

Einleitung in die Theorie der Functionen mit linearen Substitutionen in sich.

§ 65. Normalformen der Substitutionen. Functionen mit einer Fundamentalsubstitution.

Zur näheren Beurtheilung der eindeutigen Function $J(\tau)$, welche bei gewissen linearen Substitutionen des Argumentes ungeändert bleibt, richten wir die Frage allgemein nach eindeutigen analytischen Functionen $F(x)$ der Beschaffenheit, daß für bestimmte lineare Substitutionen

$$f(x) = \frac{ax + b}{cx + d}$$

an Stelle von x die Gleichung

$$F\left(\frac{ax + b}{cx + d}\right) = F(x)$$

bei jedem Werthe x aus dem Innern oder der Grenze des Stetigkeitsbereiches von $F(x)$ besteht.

Wenn wir auch nicht im Stande sind, die Theorie dieser Functionen zu entwickeln, so soll doch gezeigt werden, wie die functionentheoretische Behandlung der gestellten Frage ausfallen muß, und das thun wir um so lieber, als dabei hervorgeht, daß die auseinandergesetzte Theorie der doppeltperiodischen Functionen prototyp ist.

Wie bei der Frage nach den doppeltperiodischen Functionen zunächst die gegenseitige Beziehung der Perioden untersucht wurde,

müssen wir hier vor Allem die Substitutionen selbst betrachten. Wir nehmen hierbei gleich den Satz vorweg, daß es keine eindeutige oder endlich vieldeutige Function geben kann, die unendlich kleine Substitutionen $f(x)$ besitzt, d. h. solche, für die $|x - f(x)|$ kleiner ist als eine beliebig kleine GröÙe. —

Wir nehmen an, daß die Substitutionscoefficienten a, b, c, d , die im allgemeinen complexe GröÙen sein werden, eine *Determinante*

$$ad - bc$$

gleich Eins besitzen, denn die Division des Zählers und Nenners in $f(x)$ durch $\sqrt{ad - bc}$ gibt Coefficienten der verlangten Art.

Sind die Substitutionscoefficienten reelle GröÙen, so kann man sie durch Division von $\sqrt{ad - bc}$ oder $\sqrt{bc - ad}$ in andere reelle derart umgestalten, daß ihre Determinante ± 1 wird. In dem letzteren Falle ist die Substitution von $f(x)$ an Stelle von x — welche Operation durch das Symbol

$$(x, f(x))$$

angezeigt werden möge — offenbar unter einer Substitution

$$\left(\frac{ax + b}{cx + d}, \frac{a \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta} + b}{c \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta} + d} \right)$$

enthalten, wo a, b, c, d feste GröÙen und $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ reelle Coefficienten mit der Determinante Eins sind.

Bemerkt man, daß die Vollführung einer Substitution $(x, f(x))$ nach der ersten $(x, f(x))$ eine Substitution

$$(x, f(f(x))) = \left(x, \frac{a \frac{a'x + b'}{c'x + d'} + b}{c \frac{a'x + b'}{c'x + d'} + d} \right)$$

gibt, deren Determinante das Product der Determinanten

$$ad - bc \quad \text{und} \quad a'd' - b'c'$$

ist, so wird man zur Untersuchung der Substitutionen gleicher Determinante bloß diejenigen mit complexen oder reellen Coefficienten von der Determinante Eins zu betrachten nothwendig haben.

Man nennt x *äquivalent oder congruent* $x^{(i)}$, wenn es vier GröÙen a_i, b_i, c_i, d_i gibt, welche den Bedingungen:

$$x^{(i)} = \frac{a_i x + b_i}{c_i x + d_i}, \quad a_i d_i - b_i c_i = 1$$

genügen. Da umgekehrt:

$$x = \frac{d_i x^{(i)} + (-b_i)}{(-c_i) x^{(i)} + a_i}, \quad d_i a_i - (-b_i)(-c_i) = 1$$

wird, ist auch $x^{(i)}$ der Gröfse x äquivalent. Ist die erste Operation mit $(x, f_i(x))$ bezeichnet, so deutet man die inverse Substitution durch $(f_i(x), x)$ an.

Zwei einer dritten äquivalenten Gröfßen sind untereinander äquivalent, denn wenn in

$$x_1 = \frac{a_1 x + b_1}{c_1 x + d_1}, \quad x_2 = \frac{a_2 x + b_2}{c_2 x + d_2}$$

die Determinanten gleich Eins sind, so gibt es auch vier Gröfßen $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, für welche

$$x_1 = \frac{\alpha x_2 + \beta}{\gamma x_2 + \delta}, \quad \alpha \delta - \beta \gamma = 1$$

wird und zwar ist:

$$x_1 = \frac{(a_1 d_2 - b_1 c_2) x_2 + (b_1 a_2 - a_1 b_2)}{(c_1 d_2 - c_2 d_1) x_2 + (d_1 a_2 - b_2 c_1)}$$

$$\alpha \delta - \beta \gamma = (a_1 d_1 - b_1 c_1)(a_2 d_2 - b_2 c_2) = 1.$$

Ist nun $F(x)$ eine analytische Function, für die

$$F(f^{(i)}(x)) = F\left(\frac{a_1 x + b_1}{c_1 x + d_1}\right) = F(x)$$

ist, so wird auch

$$F(f^{(m)}(x)) = F(x),$$

wo $f^{(m)}(x)$ den durch m malige Wiederholung der Substitution $(x, f(x))$ aus x gewonnenen Argumentwerth

$$f(f(\dots f(x)) \dots)$$

bezeichnet; die Function $F(x)$ bleibt zugleich mit der ursprünglichen auch bei den neuen Substitutionen $(x, f^{(m)}(x))$ ungeändert. — Bezeichnet man

$$f^{(\mu)}(x) = \frac{a_\mu x + b_\mu}{c_\mu x + d_\mu},$$

so ist

$$f^{(m)}(x) = \frac{a_m x + b_m}{c_m x + d_m} = \frac{a_{m-1}(a_1 x + b_1) + b_{m-1}(c_1 x + d_1)}{c_{m-1}(a_1 x + b_1) + d_{m-1}(c_1 x + d_1)}$$

und

$$a_m d_m - b_m c_m = (a_1 d_1 - b_1 c_1)^m = 1.$$

Schreibt man für x $f^{(0)}(x)$, für die inverse Substitution von $f^{(1)}(x)$ $f^{(-1)}(x)$ und setzt

$$f^{(-2)}(x) = f^{(-1)}(f^{(-1)}(x)), \quad f^{(-3)}(x) = f^{(-1)}(f^{(-2)}(x)), \dots$$

$$f^{(-m)}(x) = f^{(-1)}(f^{(-m+1)}(x)),$$

so folgt ebenso

$$F(f^{(n)}(x)) = F(x),$$

wenn n irgend eine positive oder negative ganze Zahl bezeichnet.

Es ist möglich, daß eine m malige Wiederholung der Operation $(x, f(x))$ zu dem Argumentwerthe $x_m = x$ zurückführt.

Um die nothwendige und hinreichende Bedingung dafür zu finden, geben wir einer Substitution

$$\left(x, \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta}\right) \quad (\alpha\delta - \beta\gamma = 1)$$

erst besondere *Normalformen*.

Die beiden Werthe von x , für die $x = \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta}$ ist, sind

$$x' = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\alpha + \delta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\alpha + \delta}{2}\right)^2 - 1} \right) \text{ und } x'' = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\alpha + \delta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\alpha + \delta}{2}\right)^2 - 1} \right)$$

und darnach wird der Ausdruck

$$\frac{\gamma x' - \alpha}{\gamma x'' - \alpha} \quad \text{oder} \quad \frac{\beta x' + \alpha \left(-\frac{\beta}{\gamma}\right)}{\beta x'' + \alpha \left(-\frac{\beta}{\gamma}\right)} \quad \text{oder} \quad \frac{x' \beta + \alpha x''}{x'' \beta + \alpha x'}$$

gleich

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\alpha + \delta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\alpha + \delta}{2}\right)^2 - 1} \right)^2 = \\ & = -1 + \frac{1}{2} \left((\alpha + \delta)^2 - (\alpha + \delta) \sqrt{(\alpha + \delta)^2 - 4} \right) = K \end{aligned}$$

zu setzen sein und mit Hilfe dieses kann man in dem Falle von einander verschiedener Werthe x' und x'' die Substitution $y = \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta}$ auf die Form:

$$\frac{y - x'}{y - x''} = K \frac{x - x'}{x - x''}$$

bringen, denn für $x = x', x'', -\frac{\beta}{\alpha}$ folgt wie früher $y = x', x'', 0$.

K der sogenannte *Multiplicator* der Substitution ist nicht gleich Eins, wenn $(\alpha + \delta)^2$ von 4 verschieden ist oder wenn x' und x'' ungleich sind. Falls die Substitution reell d. h. die Coefficienten reelle Größen sind, wird K reell, sofern

$$(\alpha + \delta)^2 - 4 > 0$$

ist und der absolute Betrag $|K|$ ist von Eins verschieden. Ist aber

$$4 - (\alpha + \delta)^2 > 0,$$

dann wird K complex und $|K| = 1$ d. h. der Multiplicator erhält die Form $e^{i\varphi}$, wo nun φ reell ist.

Sind $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ganze Zahlen, so kann $(\alpha + \delta)^2$ unter der Bedingung $4 - (\alpha + \delta)^2 > 0$ nur die Werthe Null und Eins besitzen und dann ist der Multiplicator

$$K = -1, \text{ oder } -\left(\frac{1}{2} + \frac{i\sqrt{3}}{2}\right) = e^{-\frac{2\pi i}{3}}.$$

Sind aber die Lösungen x', x'' einander gleich oder $(\alpha + \delta)^2 = 4$ und $K = 1$, so kann die ursprüngliche Substitution nicht mehr in der früheren Normalform angeschrieben werden, denn diese wird zur Iden-

tität. Da aber jetzt in $y = \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta}$ nur mehr zwei Constante willkürlich sind, kann man der Substitution die Form

$$\frac{1}{y - x'} = \frac{1}{x - x'} + c$$

geben.

Ist in unserer früheren Substitution $(x, f^{(1)}(x))$ $(a_1 + d_1)^2 \geq 4$, so gebe man der Substitution $(x, f^{(m)}(x))$ die Form:

$$\frac{f^{(m)}(x) - x'}{f^{(m)}(x) - x''} = K^m \frac{x - x'}{x - x''}$$

und hier sieht man, daß im Falle $f^{(m)}(x) = x$

$$K^m = 1$$

werden muß, d. h. K ist eine m^{te} Wurzel der Einheit.

Ist hingegen $(a_1 + d_1)^2 = 4$ und $a_1 + d_1 = \pm 2$, so wird — wie man leicht bestätigt —

$$f^{(m)}(x) = \frac{(ma_1 \mp (m-1))x + mb_1}{mc_1x + (md_1 \mp (m-1))},$$

und weil die Forderung, es sei $f^{(m)}(x) = x$, die Gleichung

$$c_1x^2 + (d_1 - a_1)x - b_1 = 0$$

nach sich zieht, so muß schon $f^{(1)}(x) = x$ sein. Es kann also nur in dem Falle, wo

$$\left(\frac{a+d}{2} - \sqrt{\left(\frac{a+d}{2}\right)^2 - 1}\right)^{2m} = 1,$$

die Iterirung der Substitution $(x, f^{(1)}(x))$ auf x selbst zurückführen.

Fragt man nach analytischen Functionen $F(x)$, welche bloß die Substitutionen

$$(x, f^{(n)}(x)) \quad (n = \pm 1, \pm 2, \dots)$$

zulassen und bei anderen Substitutionen $(x, \tilde{f}(x))$ ihren Werth ändern, so kann man die Untersuchung folgendermaßen einrichten*). Setzt man

$$\varphi(x) = \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta},$$

so besitzt die Function

$$F(\varphi(x)) = \Phi(x)$$

zufolge der Gleichungen

$$\Phi(\varphi^{-1}(x)) = F(x)$$

$$\Phi(\varphi^{-1}(f^1(x))) = F(f(x)) = F(x) = \Phi(\varphi^{-1}(x))$$

$$\Phi(\varphi^{-1}(f^1(\varphi^1(x)))) = \Phi(x)$$

die Substitution

$$(x, \psi(x)) \equiv (x, \varphi^{-1}(f^1(\varphi^1(x))))$$

oder

$$(x, \psi(x)) \equiv \left(x, \frac{(a_1\alpha\delta + b_1\gamma\delta - c_1\alpha\beta - d_1\beta\gamma)x + (a_1\beta\delta + b_1\delta^2 - c_1\beta^2 - d_1\beta\delta)}{(-a_1\alpha\gamma - b_1\gamma^2 + c_1\alpha^2 + d_1\alpha\gamma)x + (-a_1\beta\gamma - b_1\gamma\delta + c_1\alpha\beta + d_1\alpha\delta)}\right)$$

*) Vergleiche Rausenberger: Theorie der periodischen Functionen. § 34.

und die durch Iterirung dieser gebildeten Substitutionen. Hier verfüge man ohne Rücksicht auf die bereits abgeleiteten Normalformen der Substitutionen über die Constanten $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ derart, daß $(x, \psi(x))$ eine möglichst einfache Gestalt erhält, denn dann hat auch $\Phi(x)$ einfache Substitutionen.

Soll x aus dem Nenner ausfallen, so muß

$$c_1 \alpha^2 + (d_1 - a_1) \alpha \gamma - b_1 \gamma^2 = 0$$

werden. Hierin kann man α und γ nicht gleichzeitig Null setzen, sonst wäre $\varphi(x)$ bloß eine Constante und $\Phi(x)$ hätte keine einfacheren Substitutionen als $F(x)$. Setzt man $\gamma = 0$, so wird c_1 Null und $F(x)$ wäre bereits eine Function mit einer Substitution der verlangten Art. Wir schließen daher den Fall $\gamma = 0$ aus und lösen die Gleichung

$$\left(\frac{\alpha}{\gamma}\right)^2 - \frac{a_1 - d_1}{c_1} \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) - \frac{b_1}{c_1} = 0.$$

Sind die Wurzeln verschieden, so gibt es zugleich mit $F(x)$ eine Function $\Phi(x)$, welche eine Substitution der Form

$$(x, \psi(x)) \equiv (x, Kx + k)$$

zuläßt. Bezeichnet hierauf $(x, \chi(x))$ eine neue Substitution $(x, \alpha'x + \beta')$, so existirt mit $\Phi(x)$ eine Function $\Psi(x)$, welche die Substitution:

$$(x, \chi^{-1} \psi \chi(x)) \equiv \left(x, \frac{K\alpha'x + (K\beta' - \beta' + k)}{\alpha'}\right)$$

gestattet. Wählt man hier β' so, daß $K\beta' - \beta' + k$ verschwindet, dann hat die neue Function $\Psi(x)$ die Fundamentalsubstitution:

$$(x, Kx).$$

K bezeichnet wieder den Multiplicator der ursprünglichen Substitution $(x, f(x))$, wie man leicht berechnen kann, indem man nur nach derjenigen Substitution $y = \frac{a_1x + b_1}{c_1x + d_1}$ ($a_1d_1 - b_1c_1 = 1$) fragt, die mit Hilfe der Substitution $\varphi(x) = \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta}$ aus $y = Kx$ resultirt, auf daß also

$$\frac{\alpha \frac{a_1x + b_1}{c_1x + d_1} + \beta}{\gamma \frac{a_1x + b_1}{c_1x + d_1} + \delta} = K \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta}$$

wird. Entsprechend den zwei Lösungen für $\frac{\alpha}{\gamma}$ gibt es aber zwei Multiplicatoren, doch weil

$$F(f^1(x)) = F(x) = F(f^{-1}(x))$$

ist, wird der eine nur das Reciproke des zweiten sein, oder mit anderen Worten: man kann die Substitution $(x, f(x))$ mit dem Multiplicator K ebenso wie die Substitution $(x, f^{-1}(x))$ mit dem Multiplicator $\frac{1}{K}$ als

die fundamentale Substitution ansehen, und deshalb dürfen wir voraussetzen, daß die Function $\Psi(x)$ eine Substitution (x, Kx) habe, in welcher $|K| < 1$ ist. —

Ist aber $K=1$, so gibt es zugleich mit $F(x)$ eine Function $\Phi(x)$, welche die Substitution

$$\psi(x) = x + k$$

zuläßt. Setzt man dann

$$\chi(x) = \frac{k}{c} x,$$

wo c eine beliebige Gröfse ist, so hat $\Phi(\chi(x)) = \Psi(x)$ eine Substitution:

$$\chi^{-1} \psi' \chi'(x) = \frac{c}{k} \left(\frac{k}{c} x + k \right) = x + c.$$

Fragt man wieder nach der Substitution $y = \frac{a_1 x + b_1}{c_1 x + d_1}$, die mit Hilfe von $\varphi(x) = \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta}$ aus $y = x + c$ hervorgeht, soll also

$$\frac{\alpha y + \beta}{\gamma y + \delta} = \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta} + c$$

sein, so hat man

$a_1 = -\alpha\delta + \beta\gamma - \gamma\delta$, $b_1 = -\delta^2$, $c_1 = \gamma^2$, $d_1 = -\alpha\delta + \beta\gamma + \gamma\delta$ zu setzen, und wenn $a_1 d_1 - b_1 c_1 = 1$ ist, ergibt sich für a_1 und d_1 die Bedingung

$$(a_1 + d_1)^2 - 4 = 0,$$

unter welcher auch früher $K=1$ war.

Nehmen wir an, daß $c=1$ sei, so ist die aus

$$f^1(x) = x + 1$$

gewonnene Substitution

$$f^{(n)}(x) = x + n,$$

und eine Iterirung kann niemals auf x zurückführen, d. h. eine eindeutige Function $F(x)$ mit einer linearen Substitution $(x, x+c)$ hat für unendlich viele Werthe des Argumentes denselben Werth; sie muß transcendent sein. Weil $F(x)$ an der Stelle ∞ wegen der Gleichung

$$F(x + \infty) = F(x) = F(\infty)$$

jedem Werthe beliebig nahe kommt, ist die Stelle ∞ eine wesentlich singuläre. Hat $F(x)$ noch eine andere wesentlich singuläre Stelle x_0 , so sind auch $x_0 \pm nc$ wesentlich singuläre Stellen.

Die hier genannten Functionen sind die *einfach periodischen*.

Eine eindeutige Function mit einer Substitution $y = Kx$, wo $|K| \geq 1$ ist, hat niemals eine Substitution

$$(x, f^{(n)}(x)) \equiv (x, K^n x) \equiv (x, x),$$

sie nimmt daher einen und denselben Werth unendlich oft an, und weil

$$F(K^n x) \quad \text{und} \quad F\left(\frac{x}{K^n}\right)$$

im Falle $|K| < 1$ bei unendlich werdendem n in $F(0)$ respective $F(\infty)$ übergehen, so sind die Stellen 0 und ∞ wesentlich singulär, wird ja doch

$$F(0) = F(x), \quad F(\infty) = F(x).$$

Gibt es für $F(x)$ noch eine wesentlich singuläre Stelle x_0 , so ist auch $x_0 K^r$ eine solche.

Ist $|K| = 1$, aber in $K = e^{i\varphi}$ φ kein rationales Vielfaches von 2π , so werden die Potenzen K^n jedem Werthe von dem absoluten Betrage 1 beliebig nahe kommen, und dann müßte $F(x)$ für alle Stellen gleichen Betrages denselben Werth besitzen. — Es gibt danach keine analytische Function $F(x)$ mit einer Substitution $y = Kx$, wenn in

$$K = e^{2\pi i r}$$

r irrational ist.

Ist $K^m = 1$, so ist x^m eine eindeutige Function mit den m Substitutionen

$$x, Kx, K^2x, \dots, K^{m-1}x$$

und jede andere eindeutige Function mit denselben Substitutionen hat die Gestalt $\Phi(x^m)$, wenn $\Phi(x)$ eine eindeutige Function bezeichnet.

Bezüglich der eindeutigen Functionen mit einer Substitution

$$(x, Kx),$$

wo $|K| < 1$ angenommen werden kann, verweisen wir auf Rausenberger's Untersuchungen über die Theorie der periodischen Functionen einer Variablen.

§ 66. Functionen mit zwei vertauschbaren Substitutionen.

Nach Ableitung zweier Normalformen jeder Substitution mit der Determinante Eins haben wir im vorigen Paragraphen nach denjenigen Functionen gefragt, welche bloß die aus einer Substitution $(x, f(x))$ durch Iterirung entstehenden Substitutionen zulassen. Es kann auch eintreten, daß eine analytische Function nicht bloß für die aus einer ersten Substitution $(x, f_1(x))$, sondern auch für die aus einer zweiten $(x, f_2(x))$ durch Iterirung abgeleiteten Substitutionen ungeändert bleibt. Dann ist aber nicht bloß

$$F(f_1^{(n)}(x)) = F(x) \quad \text{und} \quad F(f_2^{(n)}(x)) = F(x),$$

sondern auch

$$F(f_1^{(n)}(f_2^{(n)}(x))) = F(x) \quad \text{und} \quad F(f_2^{(n)}(f_1^{(n)}(x))) = F(x).$$

Nehmen wir an, daß zwischen den beiden Substitutionen die Gleichung besteht

$$f_1(f_2(x)) = f_2(f_1(x)),$$

in welchem Falle die Substitutionen *vertauschbar* heißen, und denken wir einer der Substitutionen die Normalform

$$f_1(x) = x + k \quad \text{oder} \quad f_1(x) = Kx$$

gegeben, und ist

$$f_2(x) = \frac{ax+b}{cx+d},$$

so ist der Annahme gemäß entweder

$$\frac{ax+b}{cx+d} + k = \frac{a(x+k)+b}{c(x+k)+d} \quad \text{oder} \quad K \frac{ax+b}{cx+d} = \frac{aKx+b}{cKx+d}.$$

Im ersten Falle muß

$$a + ck = \varrho a, \quad b + dk = \varrho(a + k), \quad c = \varrho c, \quad d = \varrho(c + d)$$

sein, wo ϱ ein Proportionalitätsfactor ist. Setzt man zufolge $c = \varrho c$ $\varrho = 1$, so ergibt sich aus $d = ck + d$ $c = 0$. Ist umgekehrt $c = 0$, so muß man wieder $\varrho = 1$ setzen, denn andernfalls müßten a , d und b auch verschwinden. Für $c = 0$, $\varrho = 1$ wird $d = a$ und darum erhält $f_2(x)$ die Gestalt

$$f_2(x) = \frac{ax+b}{a} = x + k'$$

d. h. die zweite mit $f_1(x)$ vertauschbare Substitution hat dieselbe Form wie die erste.

Die eindeutigen Functionen mit zwei Substitutionen unserer Art

$$(x, x + 2\omega) \quad \text{und} \quad (x, x + 2\omega')$$

sind die doppeltperiodischen.

Weil es nicht mehr als zweifach periodische ein- oder endlich vieldeutige Functionen einer Variablen gibt, existirt keine analytische Function, die drei von einander unabhängige und vertauschbare Substitutionen der Form $(x, x + k)$ besitzt, von denen also keine durch eine Combination der zwei übrigen darstellbar ist.

Läßt die zu suchende Function $F(x)$ eine Substitution (x, Kx) zu, so hat die mit dieser vertauschbare Substitution $f_2(x)$ wieder dieselbe Gestalt, denn jetzt ist

$$aK = \varrho aK, \quad bK = \varrho b, \quad c = \varrho Kc, \quad d = \varrho d$$

und somit

$$\varrho = 1, \quad b = 0, \quad c = 0,$$

d. h. $f_2(x)$ wird gleich

$$\frac{a}{d}x = K'x.$$

Wie aber oben 2ω und $2\omega'$ kein reelles Verhältniß haben dürfen, müssen auch hier die Größen K und K' eine besondere Eigenschaft erhalten. Setzt man

$$x = e^{2\pi i u}, \quad K = e^{2\pi i \omega}, \quad K' = e^{2\pi i \omega'},$$

so wird die Function $F(x)$ mit den Substitutionen (x, Kx) , $(x, K'x)$ in eine Function $\Phi(u)$ mit den Perioden

$$1, 2\omega, 2\omega'$$

übergehen. Zwischen diesen muß aber eine homogene ganzzahlige lineare Gleichung bestehen, und damit wird etwa

$$2\omega' = \frac{m + 2\mu\omega}{\mu'}$$

und nun:

$$K' = e^{-2\pi i \frac{m}{\mu'}} K^{-\frac{m}{\mu'}}$$

oder

$$K^\mu K'^{\mu'} = 1.$$

§ 67. Functionen mit einer endlichen Anzahl von Fundamentalsubstitutionen.

Wir legen nunmehr eine endliche Anzahl p von einander verschiedener Substitutionen:

$$(x, f_i(x)) \equiv \left(x, \frac{a_i x + b_i}{c_i x + d_i}\right) \quad (i = 1, 2, \dots, p)$$

mit der Determinante Eins zu Grunde. Wenn eine eindeutige analytische Function existirt, für die

$$F\left(\frac{a_i x + b_i}{c_i x + d_i}\right) = F(x)$$

ist, so bleibt $F(x)$ auch bei den zusammengesetzten Substitutionen:

$$(x, f_{\mu_1}^{\alpha_1}(f_{\mu_2}^{\alpha_2}(\dots f_{\mu_m}^{\alpha_m}(x) \dots)))$$

ungeändert.

Sagt man, daß ein System von Operationen eine *Gruppe* bildet, wenn die Inverse jeder einzelnen und die Combination irgend zweier dem Systeme angehört, so constituirt die Gesammtheit der eben genannten Substitutionen eine Gruppe, die durch die p Fundamentalsubstitutionen oder durch p mit Hilfe dieser gewonnenen, nicht in einander transformirbaren Substitutionen vollständig bestimmt ist.

Da eine Substitution

$$(x, f_{\mu_1}^{\alpha_1}(f_{\mu_2}^{\alpha_2}(\dots f_{\mu_m}^{\alpha_m}(x) \dots)))$$

und eine zweite

$$(x, f_{\nu_1}^{\beta_1}(f_{\nu_2}^{\beta_2}(\dots f_{\nu_n}^{\beta_n}(x) \dots)))$$

sehr wohl identisch sein kann, so ist es möglich, daß zwischen den Substitutionen einer Gruppe auch Gleichungen

$$f_{\mu_1}^{\alpha_1}(f_{\mu_2}^{\alpha_2}(\dots f_{\mu_m}^{\alpha_m}(x) \dots)) = f_{\nu_1}^{\beta_1}(f_{\nu_2}^{\beta_2}(\dots f_{\nu_n}^{\beta_n}(x) \dots))$$

bestehen, die man gewiß auf die Form:

$$f_{\lambda_1}^{r_1}(f_{\lambda_2}^{r_2}(\dots f_{\lambda_i}^{r_i}(x) \dots)) = x$$

bringen kann.

Wir wollen in dem Falle reeller und ganzzahliger Substitutionen:

$$\left(x, \frac{a_i x + b_i}{c_i x + d_i}\right) \quad (a_i d_i - b_i c_i = 1),$$

deren Gesammtheit offenbar eine Gruppe bildet, welche keine unendlich kleinen Substitutionen enthält, die Fundamentalsubstitutionen ableiten, aus denen alle anderen zusammensetzen sind.

Ist in einer Substitution

$$x' = \frac{ax + b}{cx + d},$$

wo a stets positiv gedacht werden mag, $|c| \leq a$, ferner

$$a = n_1 c + a_1, \quad |a_1| < c,$$

und n_1 eine ganze Zahl, so wird

$$x' = n_1 + \frac{a_1 x + b - n_1 d}{cx + d}.$$

Setzt man hier

$$x' = n_1 + x_1, \quad x_1 = \frac{a_1 x + b - n_1 d}{cx + d} = \frac{a_1 x + b_1}{cx + d} = f_1(x),$$

so erscheint die ursprüngliche Substitution als Combination der folgenden:

$$(x, x + n_1) \quad \text{und} \quad (x, f_1(x))$$

und zwar ist

$$a_1 d - b_1 c_1 = 1 \quad \text{und} \quad |c| > |a_1|.$$

Bezeichnet man

$$-\frac{1}{x_1} = \frac{-cx - d}{a_1 x + b_1} = x_2$$

und bildet auf die frühere Weise neben einer Substitution $x_2 = x_3 + n_2$ noch

$$x_3 = -\frac{1}{x_4}$$

und fährt so fort, dann kommt man endlich zu einer Substitution

$$x_v = \frac{b_v}{c_v x + d_v},$$

in welcher der erste Coefficient Null und deren Determinante $-b_v c_v = 1$ ist. Die ganzen Zahlen b_v und c_v können nur den absoluten Betrag 1 haben und man kann

$$x_v = -\frac{1}{x + d_v}$$

setzen. Hier gibt die Substitution $x_v = -\frac{1}{x_v + 1}$ endlich

$$x_{v+1} = x + d_v.$$

Weil alle ganzzahligen Substitutionen der Form $(x, x + n)$ durch Wiederholung aus $(x, x + 1)$ entstehen, lassen sich alle ganzzahligen Substitutionen mit der Determinante Eins durch Wiederholung und Vereinigung der zwei Fundamentalsubstitutionen

$$(x, x + 1) \quad \text{und} \quad \left(x, -\frac{1}{x}\right)$$

erzeugen.

Bezeichnet man die erste mit $(x, \varphi_1(x))$, die zweite mit $(x, \varphi_2(x))$, so ist

$$\varphi_1 \varphi_2 \varphi_1 \varphi_2 \varphi_1 \varphi_2(x) = x.$$

Ist eine Gruppe linearer Substitutionen vorgelegt, so kann man in dem Bereiche der unbeschränkt veränderlichen Größe x ein Gebiet ausfindig machen, in welchem keine zwei einander äquivalenten Stellen liegen, vorausgesetzt, daß die Gruppe keine unendlich kleinen Substitutionen enthält oder, wie man sagt, *discontinuirlich* ist. In dem Falle der reellen und ganzzahligen Substitutionen mit der Determinante Eins bestimmt man den genannten Bereich in folgender Weise *):

Da zunächst die einer Stelle $x = \xi + i\eta$ äquivalente Stelle

$$x' = \frac{\alpha\xi + \beta + i\eta\alpha}{\gamma\xi + \delta + i\eta\gamma} = \xi' + i\eta'$$

zugleich mit x eine positive oder negative Ordinate η' besitzt, so kann man die Stellen x mit negativer Ordinate außer Acht lassen; die übrigen erfüllen die *positive Halbebene*.

Man sieht, daß in dem Falle, wo die Ordinate von x :

$$\eta = \xi + i\eta - (\xi - i\eta) = \frac{x - x_0}{2i}$$

durch die Transformation $\left(x, \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta}\right)$ keine Verminderung erfährt, die Beziehung besteht:

$$(\gamma x + \delta)(\gamma x_0 + \delta) \leq 1,$$

denn es ist:

$$\eta' = \frac{1}{2i} \left(\frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta} - \frac{\alpha x_0 + \beta}{\gamma x_0 + \delta} \right) = \frac{\eta}{(\gamma x + \delta)(\gamma x_0 + \delta)} \geq \frac{x - x_0}{2i}.$$

Jetzt beweist man leicht, daß unter den den Bedingungen:

$$xx_0 > 1, \quad -1 < x + x_0 < +1$$

oder

$$|x|^2 = \xi^2 + \eta^2 > 1, \quad -\frac{1}{2} < \xi < \frac{1}{2}$$

genügenden Stellen keine äquivalenten vorkommen, denn man kann keine Substitution der Gruppe angeben, durch welche die Ordinate η in eine gleiche oder größere η' überginge.

*) Vergl. Hurwitz a. a. O.

In der That: weil dann

$$1 \geq (\gamma x + \delta)(\gamma x_0 + \delta) = \gamma^2(\xi^2 + \eta^2) + 2\gamma\delta\xi + \delta^2$$

sein müßte, aber schon die Ungleichung

$$\gamma^2 \pm \gamma\delta + \delta^2 < 1$$

keine ganzzahligen Lösungen γ, δ zuläßt, so ist die Behauptung erwiesen.

Die Stellen auf der Grenze des genannten Bereiches, d. h. die durch die Gleichungen

$$\xi^2 + \eta^2 = 1, \quad \xi = \pm \frac{1}{2}$$

definirten Stellen, sind paarweise congruent, wie die Anwendung der Substitutionen

$$(x, x \pm 1), \quad \left(x, -\frac{1}{x}\right)$$

lehrt, sie sind aber niemals einem Punkte innerhalb des Bereiches äquivalent, da die Substitutionen $(x, x+n)$ und $\left(x, -\frac{1}{x}+n\right)$ die Ordinate η ungeändert lassen und keine Substitution dieselbe vergrößert. Die Stellen ∞ und i sind sich selbst congruent, denn es ist

$$\infty = \infty \mp 1 \quad \text{und} \quad i = -\frac{1}{i}.$$

Der den beiden Bedingungen $\xi^2 + \eta^2 = 1, \xi = -\frac{1}{2}$ genügende Punkt

$$\frac{-1 + i\sqrt{3}}{2} = e^{\frac{2\pi i}{3}} = \varrho$$

ist der Stelle $\varrho + 1 = -\frac{1}{\varrho}$ äquivalent.

Nach all diesen Erörterungen finden wir in der Gesamtheit von Stellen, für welche

$$\xi^2 + \eta^2 > 1, \quad -\frac{1}{2} \leq \xi < \frac{1}{2}$$

ist und für welche bei verschwindendem oder negativem ξ auch $\xi^2 + \eta^2 = 1$ sein kann, mit Ausnahme der Stellen i und ∞ lauter inäquivalente Punkte.

Unterwirft man alle Stellen dieses (dem Periodenparallelogramm analog gebildeten) Bereiches R_0 einer Substitution

$$\left(x, \frac{\alpha_i x + \beta_i}{\gamma_i x + \delta_i}\right),$$

so werden bekanntlich die den Gebilden

$$|x|^2 = \xi^2 + \eta^2 = 1 \quad \text{und} \quad x + x_0 = -1$$

entsprechenden Gebilde wieder Kreise oder Gerade, aber niemals kann auf diesen eine Stelle liegen, die in dem Innern von R_0 eine äquivalente besitzt. Bezeichnet man den R_0 entsprechenden Bereich mit

Gehen wir wieder zu einer durch irgend eine endliche Anzahl linearer Substitutionen gegebenen discontinuirlichen Gruppe zurück und fassen auch hier einen continuirlichen, durch Gleichungen und Ungleichungen zu definirenden Bereich R_0 inäquivalenter Stellen heraus, so geht dieser durch eine lineare Substitution $(x, f_i(x))$ der Gruppe in einen Bereich R_i über. Inneren Stellen des ersten Bereiches entsprechen innere des zweiten, und Grenzstellen des einen werden nur Grenzstellen des zweiten congruent sein. Zweifach zu zählende, d. h. sich selbst äquivalente Stellen des einen Bereiches, die gewiß nur auf der Grenze liegen können (wie die Stelle i in dem früheren Beispiele), werden auch in dem zweiten Bereiche doppelt zu zählen sein oder besser zwei aneinanderstossenden Bereichen gemein sein, und mehrfach zu zählende Stellen kann es nicht geben. —

Die Begrenzung eines Bereiches kann nur durch Kreisbogen (und zwar speciell durch geradlinige Strecken) gebildet werden, denn bei linearen Substitutionen können Kreise und nur Kreise ungeändert bleiben oder in Kreise übergehen.

Nennt man die Gesamtheit inäquivalenter Stellen ein *Fundamentalpholygon*, so müssen sich die congruenten Polygone bei einer discontinuirlichen Gruppe an einander reihen lassen, und diese werden einen continuirlichen Bereich wie z. B. die positive Halbebene oder eine Kreisfläche vollständig erfüllen. Diesen Bereich erhält man dadurch, daß man von irgend einer Stelle x_0 ausgeht, diese allen Substitutionen der Gruppe unterwirft, dann die Häufungsstellen der x_0 congruenten Stellen bestimmt, ferner die zu dieser Punktmenge Q gehörige abgeleitete Punktmenge Q' bildet und den die Stelle x_0 enthaltenden, durch die Menge $Q + Q'$ begrenzten Bereich (\mathfrak{A}) fixirt. Die einer zweiten Stelle x_0' inner- oder außerhalb (\mathfrak{A}) äquivalenten Stellen haben ihre Häufungsstellen offenbar wieder in der Menge $(Q + Q')$.

Man kann nun die Aufgabe an die Spitze stellen, einen Bereich durch lückenlos aneinander gereihte Polygone auszufüllen, die durch lineare Substitutionen ineinander überzuführen sind.*) Man findet dabei die nothwendigen und hinreichenden Bedingungen, denen das Polygon zu genügen hat. Diese Bedingungen auf die Beschaffenheit der Substitutionen übertragen, geben die Bedingungen, unter welchen die Gruppe discontinuirlich ist und keine Stelle des Bereiches außerhalb des Bereiches hinaustragen kann. In dem Falle zweier vertauschbarer Fundamentalsubstitutionen sind uns diese Bedingungen bekannt geworden. —

Soll nun eine eindeutige Function $F(x)$ existiren, die ihren Werth nicht ändert, wenn man x irgend einer Substitution einer discontinuir-

*) Poincaré, Acta mathematica Bd. 1 und 3.

lichen Gruppe unterwirft, so ist klar, daß $F(x)$ jeden Werth, den diese Function annimmt, in jedem einzelnen Fundamentalpolygon erhalten und somit in diesem Polygon unendlich werden und jeden Werth annehmen muß. Ferner aber besitzt sie einen und denselben Werth in jedem Polygon R_j gleich oft.

Wollte man die Existenz der Function $F(x)$ nachweisen, so hätte man eine der Function $\sigma(x)$ analog gebildete Hilfsfunction $\varphi(x)$ aufzustellen, die in jedem Polygon, das aus einem ersten abzuleiten ist, einmal verschwindet und nur an den Häufungsstellen der erst gewählten Nullstelle x_0 und den Stellen der abgeleiteten Punktmenge dieser letzten wesentliche Singularitäten besitzt. Bezeichnet dann φ_μ diese Hilfsfunction, die in dem ersten Polygon an der Stelle a_μ , φ_μ' diejenige, welche daselbst an der Stelle b_μ verschwindet, so wird der Ausdruck

$$\frac{\varphi_1 \varphi_2 \dots \varphi_m}{\varphi_1' \varphi_2' \dots \varphi_n'} e^{G(x)},$$

wo $G(x)$ in dem Bereiche (\mathfrak{A}) nicht unendlich wird, eine Function, die innerhalb \mathfrak{A} vom Charakter der rationalen Function ist und in jedem Polygon m Nullstellen und n Unendlichkeitsstellen aufweist.

Damit diese bloß in dem Bereiche (\mathfrak{A}) existirende Function bei den Substitutionen ungeändert bleibt, werden aber die Null- und Unendlichkeitsstellen besondere Beziehungen erfüllen und $G(x)$ eine besondere Beschaffenheit aufweisen müssen.

Im Falle der doppeltperiodischen Functionen, die im Endlichen nur außerwesentlich singuläre Stellen besitzen, war die Anzahl der Null- und Unendlichkeitsstellen in jedem Polygone (Parallelogramme) dieselbe. Doppeltperiodische Functionen gab es nicht und ferner war bei den Functionen r^{ten} Grades stets eine Nullstelle durch die r Unendlichkeits- und $(r-1)$ Nullstellen bis auf eine Periode bestimmt.

Für die hier in Rede stehenden eindeutigen Functionen *mit linearen Substitutionen in sich*, die in ihrem Giltigkeitsbereiche (\mathfrak{A}) vom Charakter der rationalen Functionen sind, gelten analoge Sätze.

Vor Allem besitzt jede solche Function in jedem Fundamentalpolygone ebensoviele Null- als Unendlichkeitsstellen und nimmt dann auch jeden Werth gleich oft an. Versteht man darnach unter dem Grade der Function die Zahl, welche angibt, wie oft die Function in dem Fundamentalpolygone jeden Werth erhält — wobei die Stellen unter denselben Bedingungen mehrfach zu zählen sind, wie bei den rationalen Functionen —, so wird sich ferner herausstellen, daß es je nach Art der Gruppe (oder der Fundamentalsubstitutionen), die wir hier allerdings nicht unterscheiden lernten, keine Functionen gibt, die vom nullten, ersten oder q^{ten} Grade wären.

Heißt die zu einer Gruppe gehörige Function vom ϱ^{ten} Range oder Geschlechte, wenn es keine Function ϱ^{ten} Grades gibt, die bei den Substitutionen ungeändert bleibt, wohl aber eine Function $(\varrho+1)^{\text{ten}}$ Grades existirt (wonach die doppeltperiodischen Functionen vom ersten Range sind), so werden von den r Nullstellen einer Function r^{ten} Grades und ϱ^{ten} Ranges ϱ Nullstellen oder doch ϱ diesen äquivalente Stellen durch die r Unendlichkeits- und $(r-\varrho)$ übrigen Nullstellen bestimmt sein.

Angenommen, diese Sätze seien bewiesen, dann folgt, daß zwischen zwei zu derselben Gruppe gehörigen Functionen $F_1(x)$ und $F_2(x)$ vom r_1 und r_2^{ten} Grade und dem Range ϱ eine algebraische Gleichung

$$G(F_1, F_2) = 0$$

besteht.

In der That: betrachtet man F_2 als Function von F_1 , so gehören einem Werthe von F_1 r_1 im Allgemeinen verschiedene inäquivalente Werthe des Argumentes x und diesem r_1 im Allgemeinen verschiedene Werthe von F_2 zu. F_2 ist also eine r_1 -deutige Function von F_1 und als Lösung einer algebraischen Gleichung r_1^{ten} Grades aufzufassen, deren Coefficienten nur rationale Functionen von F_1 sind, indem die elementarsymmetrischen Functionen der zu einem Werthe von F_1 gehörigen Werthe von F_2 als Functionen von F_1 durchwegs vom Charakter der rationalen Function sind.

Eine rationale Function von F_1 und F_2 ist wieder eine eindeutige analytische Function von x , welche dieselben Substitutionen zuläßt wie $F_1(x)$ und $F_2(x)$.

Zeigt man umgekehrt, daß jede zu derselben Gruppe gehörige Function $\Phi_1(x)$ rational durch F_1 und F_2 darstellbar ist (wie jede doppeltperiodische Function mit dem Periodenpaare $(2\omega, 2\omega')$ rational durch die zu demselben Paare gehörende Function $p(x)$ und deren Ableitung $p'(x)$ auszudrücken ist) und bemerkt, daß $\Phi_1(x)$ mindestens $(\varrho+1)$ Unendlichkeitsstellen in dem Elementarpolygone haben muß, so leuchtet ein, daß die algebraische Gleichung

$$G(F_1, F_2) = 0$$

vom Range ϱ ist. —

Daneben besteht dann der Satz: Sind $\Phi_1(x)$ und $\Phi_2(x)$ wieder zu der Gruppe von F_1 und F_2 gehörende Functionen, zwischen denen eine algebraische Gleichung

$$\Gamma(\Phi_1, \Phi_2) = 0$$

besteht, so kann man nicht allein Φ_1 und Φ_2 rational durch F_1 und F_2 , sondern auch F_1 und F_2 rational durch Φ_1 und Φ_2 darstellen, d. h. die Gleichung $\Gamma=0$ gehört derselben Klasse an wie die zwischen F_1 und F_2 ; sie ist auch vom Range ϱ .

Soweit wollte ich hier den Plan für eine Theorie der eindeutigen Functionen mit linearen Substitutionen in sich entwerfen, um anzuzeigen, wie auch die algebraischen Gleichungen $G(\xi, \eta) = 0$ höheren als ersten Ranges durch eindeutige Functionen zu behandeln wären, indem man darin ξ und η als eindeutige Functionen einer neuen unabhängigen Variablen x betrachtet. Allerdings hat man dabei noch eine wichtige Aufgabe zu lösen, die der Bestimmung primitiver Perioden von $\xi = p(x)$ analog ist, wenn eine Gleichung

$$\eta^2 - 4\xi^3 + g_2\xi + g_3 = 0$$

vorgegeben ist, d. h. man muß die Substitutionen ermitteln, welche die eine vorgelegte Gleichung lösenden Functionen $\xi(x)$, $\eta(x)$ zulassen.

Die hier skizzierte functionentheoretische Behandlung der Functionen mit linearen Substitutionen in sich ist nicht im Entferntesten durchgeführt, und die größte Schwierigkeit scheint gleich in der Construction der fundamentalen Hilfsfunction φ zu liegen, die nach der Gruppe verschieden ausfallen muß, aber erst in dem einzigen speciellen Falle der Functionen nullten Ranges angegeben ist. *) M. Poincaré hat zwar die Existenz der Functionen — wenigstens im Principe — bewiesen und die Abhängigkeit der zu derselben Gruppe gehörigen Functionen erschlossen, und der Verf. machte dann die Unterscheidung der Functionen φ ^{ten} Ranges, so daß all die genannten Sätze auf Wahrheit Anspruch machen, sie konnten aber hier nicht entwickelt werden, wenn wir von der Betrachtung der Riemann'schen Flächen und ihren conformen Abbildungen keinen Gebrauch machten, und das durften wir nicht, wenn wir an dem functionentheoretischen oder rein analytischen Wege festhalten. **)

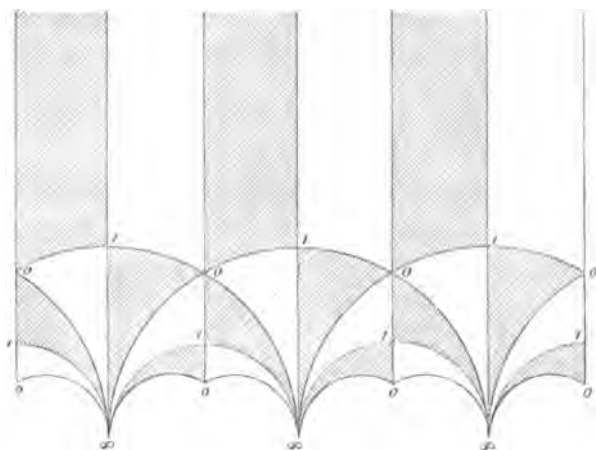
Wir gehen noch einmal auf die zu der Gruppe aller ganzzahligen linearen Substitutionen mit der Determinante Eins gehörige Function $J(\tau)$ zurück, die vom ersten Grade und nullten Range ist, weil $J(\tau)$ in dem Bereiche R_0 nur für $\tau = i\infty$ und $\frac{1}{J(\tau)}$ nur für $\tau = \varphi$ von der ersten Ordnung unendlich wird. Die beigefügte Figur zeigt wieder die Art der Werthevertheilung an den verschiedenen Stellen des Bereiches von τ . An den Stellen φ und $-\frac{1}{\varphi}$ und den äquivalenten kommen je sechs dem Ausgangsbereiche R_0 äquivalente Bereiche zusammen, und $\tau = i$ und die congruenten Stellen sind Grenzstellen zweier durch die Substitution $(x, -\frac{1}{x})$ auseinander hervorgehender Bereiche. Von

*) Mangoldt, Göttinger Nachrichten 1886.

**) Bezüglich der Functionen mit ganzzahligen Substitutionen in sich verweise ich auf die mannigfachen Arbeiten Klein's in den Mathem. Annalen.

einer Stelle $\frac{\alpha\varrho+\beta}{\gamma\varrho+\delta}$ oder $\frac{\alpha(-\frac{1}{\varrho})+\beta}{\gamma(-\frac{1}{\varrho})+\delta}$ führen aber nur je drei und von

Stellen $\frac{\alpha i+\beta}{\gamma i+\delta}$ nur je zwei äquivalente Wege nach congruenten Punkten der in eben diesen Stellen zusammenstossenden Bereiche, denn in der



Figur sind die schraffirten und ebenso die ungeschraffirten Theile äquivalente Bereiche. Getrennt sind diese Theile in dem Bereiche R' durch einen die Punkte $\frac{\alpha'}{\gamma'}$ und $\frac{\alpha' i + \beta}{\gamma' i + \delta}$ verbindenden Kreisbogen, dessen zugehöriger Mittelpunkt auf der reellen Axe liegt. —

Betrachtet man daher die unendlich vieldeutige Umkehrungsfunktion von $J(\tau)$, so werden die Stellen $J=0$, $J=1$ für τ Verzweigungspunkte je dreier oder zweier Zweige, aber $J=\infty$ ein Verzweigungspunkt aller Zweige sein. Die Function $\tau(J)$ kann für keinen von 0, 1 und ∞ verschiedenen Werth Null sein und ihr imaginärer Theil ist immer positiv.

Eine wichtige Anwendung dieser Function $\tau(J)$ hat Picard gemacht, indem er bewies, daß eine ganze transcendente Function $G(x)$ höchstens einen endlichen Werth a im Endlichen nicht annehmen könne. In der That: gäbe es zwei Werthe a und b , die eine ganze Function $G(x)$ nicht erhält, so ist offenbar

$$\frac{G(x) - a}{b - a} = g(x)$$

eine ganze Function, welche die Werthe 0 und 1 nicht annimmt. Setzt man dann

$$g(x) = J(\tau),$$

so entspricht einem von x_0 ausgehenden, im Endlichen verlaufenden,

geschlossenen Wege ein geschlossener Weg (S) in dem Bereiche von J , der niemals durch die Stellen 0 oder 1 oder ∞ führen kann, weil ja $g(x)$ diese Werthe nicht annimmt. Daher werden 0, 1 und ∞ stets auferhalb des durch S begrenzten Bereiches liegen. Geht man nun von irgend einer x_0 zuzuordnenden Stelle τ_0 aus, so wird τ — als Function von x angesehen — stets eindeutig und endlich sein, d. h. τ wird eine ganze Function von x_0 , die wir etwa mit $f(x)$ bezeichnen. Da ihr imaginärer Theil stets positiv ist, muß dann $e^{if(x)}$ eine ganze Function sein, deren absoluter Betrag stets kleiner ist als Eins. Dies ist nicht anders möglich, als wenn $f(x)$ und dann auch $g(x)$ eine Constante ist. Der Satz ist somit bewiesen.

*) Annales de l'école normale 2^e série t. 9.

Achtes Capitel.

Analytische Functionen mehrerer Variabeln.

§ 68. Das Verhalten einer analytischen Function in der Umgebung einer Nullstelle.

Die analytischen Functionen mehrerer Variabeln $(x_1, x_2, \dots x_n)$ waren ebenso wie die einer Variablen durch ein System in einander fortsetzbarer Potenzreihen

$$\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | a_1, a_2, \dots a_n) \\ = \sum_{(\mu_p)=0}^{\infty} a_{\mu_1, \mu_2, \dots \mu_n} (x_1 - a_1)^{\mu_1} (x_2 - a_2)^{\mu_2} \dots (x_n - a_n)^{\mu_n}$$

definiert. Die einzelne Potenzreihe und deren Fortsetzungen stellen eine eindeutige Function dar, wenn in der Umgebung einer Stelle nur ein Element existirt. Der $(2n)$ -fach ausgedehnte Stetigkeitsbereich der eindeutigen analytischen Function d. h. die Gesamtheit der Stellen, in deren Umgebung die Function durch eine Potenzreihe darstellbar oder regulären Verhaltens ist, war nothwendig durch Stellen begrenzt, in deren Umgebung keine aus dem primitiven Elemente abgeleitete Potenzreihe aufzustellen ist.

Es soll nunmehr untersucht werden, wie sich eine eindeutige Function an solch ausgezeichneten Stellen verhält.

Bei der analogen Frage für Functionen einer Variablen war uns das Verhalten derselben an einer Nullstelle und die nothwendige und hinreichende Bedingung dafür, daß die Function $F(x)$ an einer Stelle $x = a$ regulären Verhaltens ist, sehr behilflich. Wir erkannten, daß $F(x)$ in der Umgebung einer regulären Nullstelle $x = x_0$ stets die Form besitzt

$$(x - x_0)^n \mathfrak{P}(x | x_0),$$

wo die Potenzreihe in einer endlichen Umgebung von x_0 nicht verschwindet. Es entsteht die Frage, ob man eine in der Umgebung einer Stelle $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots x_n^{(0)})$ oder $(x^{(0)})$ analytische Function $F(x_1, x_2, \dots x_n)$, die für $x_1 = x_1^{(0)}, x_2 = x_2^{(0)}, \dots x_n = x_n^{(0)}$ und dann gewiß auch für

unendlich viele Stellen des Convergenzbereiches der die Function darstellenden Potenzreihen $\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n | (x^{(0)}))$ verschwindet — wobei diese Stellen aber $(x^{(0)})$ nicht zur Häufungsstelle haben können — in entsprechender Weise ausdrücken kann, also als Product einer in endlichem Bereiche um die Stelle $(x^{(0)})$ nicht verschwindenden Potenzreihe und einer analytischen Function, die daselbst all die Nullstellen von $F(x_1, x_2, \dots x_n)$ annimmt. Der einfacheren Schreibweise wegen sprechen wir von einer Function

$$F(x, x_1, x_2, \dots x_n),$$

welche Null wird, wenn alle $(n+1)$ Variabeln verschwinden.

Bezeichnet man $F(x, 0, 0 \dots 0)$ mit $F_0(x)$ und setzt voraus, daß $F_0(x)$ nicht identisch Null ist, schreibt dann

$$F(x, x_1, x_2, \dots x_n) = F_0(x) - F_1(x, x_1, \dots x_n),$$

wo $F_1(x, 0, 0, \dots 0)$ identisch verschwinden muß, so kann man eine positive GröÙe ϱ_1 derart bestimmen, daß $F_0(x)$ in dem Bereiche:

$$0 < |x| \leq \varrho_1$$

nicht verschwindet und die Potenzreihe für $F_1(\varrho_1, x_1, \dots x_n)$ convergirt, ohne daß eine der GröÙen $x_1, x_2, \dots x_n$ Null ist. — Ist ϱ_0 eine positive GröÙe innerhalb des Intervalles von 0 bis ϱ_1 und beschränkt man $|x|$ auf den Bereich, wo

$$\varrho_0 < |x| < \varrho_1,$$

so kann man ferner eine positive GröÙe ϱ so klein wählen, daß für alle Werthesysteme $(x, x_1, \dots x_n)$, welche den Bedingungen genügen:

$$|x_\nu| < \varrho \quad (\nu = 1, 2 \dots n) \quad \text{und} \quad \varrho_0 < |x| < \varrho_1,$$

die Ungleichung besteht

$$|F_0(x)| > |F_1(x, x_1, \dots x_n)|,$$

und dann darf man

$$\frac{1}{F(x, x_1, \dots x_n)} = \frac{1}{F_0} \frac{1}{1 - \frac{F_1}{F_0}} = \frac{1}{F_0} \sum_{\lambda=0}^{\infty} \left(\frac{F_1}{F_0}\right)^\lambda$$

und

$$\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x} = \left(\frac{\partial F_0}{\partial x} - \frac{\partial F_1}{\partial x}\right) \frac{1}{F_0} \sum_{\lambda=0}^{\infty} \left(\frac{F_1}{F_0}\right)^\lambda = \frac{1}{F_0} \frac{\partial F_0}{\partial x} - \sum_{\lambda=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{F_1}{F_0}\right)^\lambda$$

setzen. Doch weil die Summe

$$\sum_{\lambda=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda} \left(\frac{F_1}{F_0}\right)^\lambda$$

in dem genannten Bereiche gleichmäßig convergirt, gilt daselbst auch die Gleichung

$$\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{1}{F_0} \frac{\partial F_0}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \sum_{\lambda=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda} \left(\frac{F_1}{F_0}\right)^\lambda.$$

Beginnt die Entwicklung von $F_0(x)$ mit dem Gliede Cx^m , so wird

$$\frac{1}{F_0} \frac{\partial F_0}{\partial x} = \frac{m}{x} + \mathfrak{P}(x),$$

und indem

$$\frac{1}{\lambda} \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^\lambda = \sum_{\mu=0}^{\infty} \mathfrak{P}_\mu^{(\lambda)}(x_1, x_2, \dots, x_n) x^{-m\lambda+\mu}$$

$$\sum_{\lambda=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda} \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^\lambda = \sum_{\nu=-\infty}^{+\infty} \mathfrak{P}_\nu(x_1, x_2, \dots, x_n) \cdot x^\nu$$

gesetzt werden kann, wo $\mathfrak{P}_\mu^{(\lambda)}$ und \mathfrak{P}_ν convergente Potenzreihen sind, so erhält man für $\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x}$ eine Darstellung der Form:

$$\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{m}{x} + \mathfrak{P}(x) - \frac{\partial}{\partial x} \sum_{\nu=-\infty}^{+\infty} \mathfrak{P}_\nu(x_1, x_2, \dots, x_n) x^\nu.$$

Man kann jetzt zeigen, daß innerhalb des Bereiches, wo $|x_\nu| < \varrho$ ($\nu = 1, 2 \dots n$) ist, zu jeder Stelle Werthe von x gehören, die die Gleichung

$$F(x, x_1, \dots, x_n) = 0$$

befriedigen und dem absoluten Betrage nach kleiner sind als ϱ_1 . In der That: könnte man für eine solche Stelle $(a_1, a_2 \dots a_n)$ keine Wurzel der Gleichung

$$F_0(x) - F_1(x, a_1, a_2, \dots, a_n) = 0$$

finden, deren Betrag kleiner ist als ϱ_1 , so liefse sich $\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x}$ in dem Bereiche, wo $|x| < \varrho_1$, in eine bloß positive ganze Potenzen von x enthaltende Reihe entwickeln, die für die in dem Bereiche $\varrho_0 < |x| < \varrho_1$ liegenden Stellen mit der früheren übereinstimmen müßte. Doch das ist unmöglich, indem diese Entwicklung ein Glied $\frac{m}{x}$ enthält.

Heißen die einer Stelle (x_1, x_2, \dots, x_n) zuzuordnenden Nullstellen von $F(x, x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(r)},$$

jede so oft genommen, als die Ordnungszahl anzeigt, so kann man

$$\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x} = \sum_{\kappa=1}^r \frac{1}{x - x^{(\kappa)}}$$

in eine für alle Werthe von x , deren Betrag kleiner ist als ϱ_1 , convergente Potenzreihe $\overline{\mathfrak{P}}(x)$ entwickeln. Beschränkt man aber $|x|$ auf den Bereich, wo

$$\varrho_0 < |x| < \varrho_1 \quad \text{und} \quad |x^{(\kappa)}| < |x| \quad (\kappa = 1, 2 \dots r)$$

ist, so wird auch

$$\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x} = \mathfrak{P}(x) + \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(x^{(1)})^v + (x^{(2)})^v + \dots + (x^{(r)})^v}{x^{v+1}}.$$

Jetzt gibt der Vergleich der Darstellungen für $\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x}$ die Beziehung:

$$(x^{(1)})^0 + (x^{(2)})^0 + \dots + (x^{(r)})^0 = r = m,$$

d. h. jeder Stelle (x_1, x_2, \dots, x_n) in der Umgebung ϱ von $x_1 = 0, x_2 = 0, \dots, x_n = 0$ kann man m der Gleichung $F = 0$ genügende Werthe von x zuordnen, deren Betrag kleiner ist als ϱ_1 .

Bezeichnet man die Summe der v^{ten} Potenzen:

$$(x^{(1)})^v + (x^{(2)})^v + \dots + (x^{(r)})^v \text{ mit } s_v,$$

so lehrt der Vergleich unserer Darstellungen ferner, daß

$$s_v = v \mathfrak{P}_{-v}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

ist. Setzt man daher

$$g(x, x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{x=1}^m (x - x^{(x)}) = x^m + g_1 x^{m-1} + \dots + g_m$$

und

$$\frac{1}{g} \frac{\partial g}{\partial x} = \sum_{x=1}^m \frac{1}{x - x^{(x)}},$$

oder

$$\frac{m x^{m-1} + (m-1) g_1 x^{m-2} + \dots + g_{m-1}}{x^m + g_1 x^{m-1} + \dots + g_m} = \frac{m}{x} + \sum_{v=1}^{\infty} \frac{s_v}{x^{v+1}}$$

und bestimmt hieraus die Coefficienten von $g(x, x_1, \dots, x_n)$ als ganze rationale Functionen von s_1, s_2, \dots, s_m

$$g_1 = -s_1$$

$$2g_2 = -s_2 - s_1 g_1$$

$$\dots \dots \dots$$

$$m g_m = -s_m - s_{m-1} g_1 - \dots - s_1 g_{m-1},$$

oder als ganze rationale Functionen der m Potenzreihen

$$\mathfrak{P}_{-v}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (v = 1, 2 \dots m),$$

so sind $g_1, g_2 \dots g_m$ selbst Potenzreihen von x_1, x_2, \dots, x_n , die in der Umgebung ϱ von $x_1 = 0, x_2 = 0 \dots x_n = 0$ convergiren. Die m verlangten Werthe von x ergeben sich als Lösungen der Gleichung m^{ten} Grades:

$$x^m + g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) x^{m-1} + \dots + g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0.$$

Da die Vergleichung der zwei Ausdrücke für $\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x}$ auf die innerhalb des Bereiches ϱ_1 um die Stelle $x = 0$ gültige Gleichung führt:

$$\overline{\mathfrak{P}}(x) = \mathfrak{P}(x) - \sum_{v=0}^{\infty} (v+1) \mathfrak{P}_{v+1}(x_1, x_2, \dots, x_n) x^v,$$

ist auch

$$\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{1}{g} \frac{\partial g}{\partial x} + \mathfrak{P}(x) - \sum_{v=0}^{\infty} (v+1) \mathfrak{P}_{v+1}(x_1, x_2, \dots, x_n) x^v.$$

Ist dann $f(x, x_1, \dots, x_n)$ die für alle den Bedingungen

$$|x| < \varrho, \quad |x_v| < \varrho \quad (v = 1, 2, \dots, n)$$

genügenden Werthesysteme convergente Potenzreihe, deren logarithmische Ableitung nach x gerade

$$\mathfrak{P}(x) - \sum_{v=0}^{\infty} (v+1) \cdot \mathfrak{P}_{v+1}(x_1, x_2, \dots, x_n) \cdot x^v$$

ist, wobei $f(0, 0, \dots, 0)$ den Werth 1 hat, so erhält man aus

$$\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{1}{g} \frac{\partial g}{\partial x} + \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x}$$

die Gleichung

$$F(x, x_1, \dots, x_n) = Cg(x, x_1, \dots, x_n)f(x, x_1, \dots, x_n),$$

worin C den schon genannten Coefficienten von x^m in $F_0(x)$ bezeichnet. Nun ist $F(x, x_1, \dots, x_n)$ durch das Product zweier Potenzreihen f und g dargestellt, deren zweite eine ganze rationale Function von x ist. Da die Coefficienten in g und f nicht von den Gröſsen ϱ und ϱ_1 abhängen, ist die vorstehende Gleichung gültig, solange die Potenzreihen F, g, f in der Umgebung von (0) convergiren.

Will man all die Werthsysteme aus der nächsten Umgebung der Stelle (0) angeben, welche die Gleichung $F=0$ erfüllen, so wähle man diese so klein, daß alle Stellen (x, x_1, \dots, x_n) derselben in dem Convergencebereiche von F, g und f liegen und $f(x, x_1, \dots, x_n)$ auch an keiner dieser Stellen Null wird, dann sind die fraglichen Werthesysteme die Lösungen der Gleichung

$$g(x, x_1, \dots, x_n) = 0.$$

Man bemerke noch, daß die Coefficienten dieser Gleichung g_1, \dots, g_m an der Stelle $x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$ verschwinden. —

Lassen wir die bei den vorstehenden Entwicklungen gemachte Annahme fallen, daß $F_0(x)$ nicht identisch Null sei, so kann man durch Einführung $(n+1)$ neuer Variabeln y, y_1, \dots, y_n leicht auf den früheren Fall zurückkommen. In der That: setzt man

$$x = a_{00}y + a_{01}y_1 + \dots + a_{0n}y_n$$

$$x_1 = a_{10}y + a_{11}y_1 + \dots + a_{1n}y_n$$

$$\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$$

$$x_n = a_{n0}y + a_{n1}y_1 + \dots + a_{nn}y_n,$$

wo die Gröſsen a solche Constante sind, daß die Determinante des

Gleichungssystems nicht verschwindet und bei der Substitution in die Entwicklung

$$F(x, x_1, \dots x_n) = (x, x_1, \dots x_n)_\mu + (x, x_1, \dots x_n)_{\mu+1} + \dots$$

— wo $(x, x_1, \dots x_n)_\lambda$ die Summe aller Glieder λ^{ter} Dimension bezeichnet — das Aggregat

$$(a_{00}, a_{10}, \dots a_{n0})_\mu$$

nicht Null wird, so geht F in eine Function $\Phi(y, y_1, \dots y_n)$ über, in welcher

$$\begin{aligned} \Phi(y, 0, \dots 0) &= \Phi_0(y) = (a_{00}, a_{10}, \dots a_{n0})_\mu y^\mu \\ &+ (a_{00}, a_{10}, \dots a_{n0})_{\mu+1} y^{\mu+1} + \dots \end{aligned}$$

nicht identisch verschwindet. Darum läßt sich $\Phi(y, y_1, \dots y_n)$ in der Form darstellen:

$$C[y^\mu + \gamma_1(y_1, y_2, \dots y_n)y^{\mu-1} + \dots + \gamma_\mu(y_1, y_2, \dots y_n)]\varphi(y, y_1, \dots y_n),$$

worin $\gamma_1, \gamma_2, \dots \gamma_\mu$ für $y_1 = y_2 = \dots = y_n$ verschwindende Potenzreihen sind, indess die Reihe $\varphi(y, y_1, \dots y_n)$ an der Stelle (0) keine Nullstelle hat. Setzt man die Reihe φ wieder in eine Reihe $f(x, x_1, x_2, \dots x_n)$ um und wählt eine positive Gröfse r so, daß die Reihe f in der Umgebung r der Stelle (0) nicht verschwindet und die den Stellen (x) entsprechenden Werthesysteme $(y_1, y_2, \dots y_n)$ dem gemeinsamen Convergencebereiche der Reihen $\gamma_1, \gamma_2, \dots \gamma_\mu$ angehören, bestimmt dann die jedem solchen Systeme durch die Gleichung

$$y_\mu + \gamma_1 y^{\mu-1} + \dots + \gamma_\mu = 0$$

zugeordneten μ y -Werthe und darauf die zu den verschiedenen Werthesystemen gehörigen Systeme $x, x_1, \dots x_n$, so hat man wieder die Lösungen der Gleichung $F(x, x_1, \dots x_n) = 0$ aus der Umgebung r der Stelle (0) gefunden.

§ 69. Der Quotient zweier Potenzreihen.

Wir benutzen diese Sätze über die an einer Stelle (a) verschwindende analytische Function zur Untersuchung des Quotienten zweier in einer Umgebung der Stelle (0) convergenter Potenzreihen:

$$\frac{\mathfrak{P}_1(x, x_1, \dots x_n)}{\mathfrak{P}_2(x, x_1, \dots x_n)}.$$

Sagt man, daß \mathfrak{P}_1 durch \mathfrak{P}_2 theilbar sei, wenn sich der Quotient in eine neue Potenzreihe \mathfrak{P}_0 entwickeln läßt, so ist \mathfrak{P}_1 gewiß durch \mathfrak{P}_2 theilbar, wenn $\mathfrak{P}_2(0, 0 \dots 0)$ nicht Null ist, und man hat

$$\mathfrak{P}_1(x, x_1 \dots x_n) = \mathfrak{P}_0(x, x_1 \dots x_n) \mathfrak{P}_2(x, x_1 \dots x_n).$$

Ist $\mathfrak{P}_2(0, \dots 0) = 0$, ohne dafs $\mathfrak{P}_1(0 \dots 0)$ gleichzeitig verschwindet, so kann man den Quotienten nicht mehr durch eine in der Umgebung von (0) convergente Potenzreihe darstellen; sollte aber

$$\mathfrak{P}_1(0, 0 \dots 0) \quad \text{und} \quad \mathfrak{P}_2(0, 0 \dots 0)$$

verschwinden, so kann \mathfrak{P}_1 unter gewissen Bedingungen durch \mathfrak{P}_2 theilbar sein.

Vollführt man zunächst die lineare Substitution:

$$x = c_{00}t + c_{01}t_1 + \dots + c_{0n}t_n$$

$$x_1 = c_{10}t + c_{11}t_1 + \dots + c_{1n}t_n$$

$$\dots \dots \dots$$

$$x_n = c_{n0}t + c_{n1}t_1 + \dots + c_{nn}t_n,$$

deren Constante wieder so zu wählen sind, dafs die Determinante des Gleichungssystems nicht Null ist und die Reihen

$$\mathfrak{P}_1(c_{00}t, c_{10}t, \dots c_{n0}t) \quad \text{und} \quad \mathfrak{P}_2(c_{00}t, c_{10}t, \dots c_{n0}t)$$

nicht identisch verschwinden, so kann man

$$\mathfrak{P}_1(x, x_1, \dots x_n)$$

$$= [t^\mu + g'_1(t_1, t_2, \dots t_n)t^{\mu-1} + \dots + g'_\mu(t_1, t_2, \dots t_n)] \overline{\mathfrak{P}}_1(t, t_1, \dots t_n)$$

$$= g_1(t, t_1, \dots t_n) \overline{\mathfrak{P}}_1(t, t_1, \dots t_n),$$

$$\mathfrak{P}_2(x, x_1, \dots x_n)$$

$$= [t^\nu + g''_1(t_1, t_2, \dots t_n)t^{\nu-1} + \dots + g''_\nu(t_1, t_2, \dots t_n)] \overline{\mathfrak{P}}_2(t, t_1, \dots t_n)$$

$$= g_2(t, t_1, \dots t_n) \overline{\mathfrak{P}}_2(t, t_1, \dots t_n)$$

setzen, wo die Potenzreihen $g'_1, g'_2, \dots g'_\mu$ und $g''_1, g''_2, \dots g''_\nu$ für verschwindende Variabelnwerthe Null sind und

$$\overline{\mathfrak{P}}_1(0, 0, \dots 0), \quad \overline{\mathfrak{P}}_2(0, 0, \dots 0)$$

nicht verschwinden. Es besteht demnach die Gleichung:

$$\frac{\mathfrak{P}_1(x, x_1, \dots x_n)}{\mathfrak{P}_2(x, x_1, \dots x_n)} = \frac{g_1(t, t_1, \dots t_n)}{g_2(t, t_1, \dots t_n)} \cdot \frac{\overline{\mathfrak{P}}_1(t, t_1, \dots t_n)}{\overline{\mathfrak{P}}_2(t, t_1, \dots t_n)}.$$

Ist R eine positive Gröfse derart, dafs für alle den Bedingungen:

$$|t| \leq R, \quad |t_1| \leq R, \dots |t_n| \leq R$$

genügenden Stellen die obigen Transformationen gelten und die Reihen $\overline{\mathfrak{P}}_1$ und $\overline{\mathfrak{P}}_2$ in diesem Bereiche nicht verschwinden, und ist r eine positive Gröfse kleiner als R , so gewählt, dafs jedem den weiteren Bedingungen:

$$|t_1| \leq r, \dots |t_n| \leq r$$

geherchenden Werthesystemen $(t_1, t_2, \dots t_n)$ zufolge einer der Gleichungen:

$$g_1(t, t_1, \dots t_n) = 0 \quad \text{und} \quad g_2(t, t_1, \dots t_n) = 0$$

nur Werthe

$$t^{(1)}, t^{(2)} \dots t^{(m)}$$

entsprechen, deren Betrag kleiner ist als R , so wird

$$\frac{g_1(t, t_1, \dots, t_n)}{g_2(t, t_1, \dots, t_n)} = \prod_{x=1}^m (t - t^{(x)})^{\lambda_x}$$

wo λ_x ganze Zahlen sind, deren Summe gleich $(\mu - \nu)$ ist. Soll nun \mathfrak{P}_1 durch \mathfrak{P}_2 theilbar sein, so darf in dem Ausdrücke

$$\prod_{x=1}^m (t - t^{(x)})^{\lambda_x} \frac{\overline{\mathfrak{P}}_1(t, t_1, \dots, t_n)}{\overline{\mathfrak{P}}_2(t, t_1, \dots, t_n)}$$

keine der Zahlen λ_x negativ sein, denn andernfalls wäre der absolute Betrag desselben in bekannter Weise größer zu machen als jede vorgegebene Gröfse, ohne dafs g_2 verschwände. — Man sieht also, dafs die ganzen Zahlen λ_x nothwendig positiv oder Null, dafs g_1 und g_2 theilbar und somit $\mu \geq \nu$ sein mufs.

Erinnern wir uns aber, dafs man zwei ganzen Functionen $g_1(t)$ und $g_2(t)$ stets zwei weitere ganze Functionen

$f_0 t^{\mu-\nu} + f_1 t^{\mu-\nu-1} + \dots + f_{\mu-\nu}$ und $\varphi_1 t^{\nu-1} + \varphi_2 t^{\nu-2} + \dots + \varphi_\nu$ so zuordnen kann, dafs die Gleichung:

$$\begin{aligned} g_1(t) &= t^\mu + g'_1 t^{\mu-1} + \dots + g'_\mu \\ &= (t^\nu + g''_1 t^{\nu-1} + \dots + g''_\nu)(f_0 t^{\mu-\nu} + f_1 t^{\mu-\nu-1} + \dots + f_{\mu-\nu}) \\ &\quad + \varphi_1 t^{\nu-1} + \varphi_2 t^{\nu-2} + \dots + \varphi_\nu \end{aligned}$$

besteht und hierin die ν aus den Gröfsen g'_1, \dots, g'_μ und g''_1, \dots, g''_ν durch Addition und Multiplication zusammengesetzten Ausdrücke $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_\nu$ verschwinden müssen, wenn g_1 durch g_2 theilbar sein soll, dann erhalten wir die für die Theilbarkeit von \mathfrak{P}_1 durch \mathfrak{P}_2 nothwendige Bedingung: es müssen die Potenzreihen

$$\varphi_1(t_1, t_2, \dots, t_n), \dots, \varphi_\nu(t_1, t_2, \dots, t_n)$$

für jede Stelle der Umgebung r von (0) und daher identisch verschwinden. Dann aber ist

$$\begin{aligned} g_1(t, t_1, \dots, t_n) &= g_2(t, t_1, \dots, t_n) \cdot (f_0(t_1, \dots, t_n) t^{\mu-\nu} + \dots + f_{\mu-\nu}(t_1, t_2, \dots, t_n)) \\ &= g_2(t, t_1, \dots, t_n) \cdot g_0(t, t_1, \dots, t_n) \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \mathfrak{P}_2(x, x_1, \dots, x_n) &= g_2(t, t_1, \dots, t_n) \cdot \overline{\mathfrak{P}}_2(t, t_1, \dots, t_n) \\ \mathfrak{P}_1(x, x_1, \dots, x_n) &= g_2(t, t_1, \dots, t_n) \cdot g_0(t, t_1, \dots, t_n) \overline{\mathfrak{P}}_1(t, t_1, \dots, t_n) \\ &= g_0(t, t_1, \dots, t_n) \cdot \mathfrak{P}_2(x, x_1, \dots, x_n) \cdot \frac{\overline{\mathfrak{P}}_1(t, t_1, \dots, t_n)}{\overline{\mathfrak{P}}_2(t, t_1, \dots, t_n)} \\ &= \mathfrak{P}_2(x, x_1, \dots, x_n) \cdot \overline{\mathfrak{P}}_0(t, t_1, \dots, t_n). \end{aligned}$$

Führt man in der neuen Potenzreihe $\overline{\mathfrak{P}}_0$ wieder die Variabeln x, x_1, \dots, x_n ein, so erhält man wirklich

$$\frac{\mathfrak{P}_1(x, x_1, \dots, x_n)}{\mathfrak{P}_2(x, x_1, \dots, x_n)} = \mathfrak{P}_0(x, x_1, \dots, x_n).$$

Da der Stelle $t=0, t_1=0, \dots, t_n=0$ die Stelle $x=0, x_1=0, \dots, x_n=0$ entspricht und daselbst g_0 zugleich mit den Potenzreihen $f_0, f_1, \dots, f_{\mu-\nu}$ verschwindet, hat der Quotient $\frac{\mathfrak{P}_1}{\mathfrak{P}_2}$ an der Stelle Null den Werth Null. —

Es kann auch eintreten, daß die beiden an der Stelle (0) verschwindenden Potenzreihen \mathfrak{P}_1 und \mathfrak{P}_2 einen gemeinsamen Theiler

$$\mathfrak{P}(x, x_1, \dots, x_n)$$

besitzen, der ebenfalls an der Stelle (0) verschwindet, dann hat der Quotient von

$$\mathfrak{P}_1(x, x_1, \dots, x_n) = \mathfrak{P}(x, x_1, \dots, x_n) \cdot \mathfrak{P}_1^{(1)}(x, x_1, \dots, x_n)$$

$$\mathfrak{P}_2(x, x_1, \dots, x_n) = \mathfrak{P}(x, x_1, \dots, x_n) \cdot \mathfrak{P}_2^{(1)}(x, x_1, \dots, x_n)$$

in dem gemeinsamen Convergencebereiche der Reihen die Bedeutung von

$$\frac{\mathfrak{P}_1^{(1)}(x, x_1, \dots, x_n)}{\mathfrak{P}_2^{(1)}(x, x_1, \dots, x_n)}.$$

Die nothwendige und hinreichende Existenzbedingung eines gemeinsamen Theilers $\mathfrak{P}(x, x_1, \dots, x_n)$ ist nicht mehr schwer zu finden.

Stellt man ebenso wie früher

$$\mathfrak{P}_1(x, x_1, \dots, x_n) \text{ in der Form } g_1(t, t_1, \dots, t_n) \overline{\mathfrak{P}}_1(t, t_1, \dots, t_n)$$

$$\mathfrak{P}_2(x, x_1, \dots, x_n) \text{ in der Form } g_2(t, t_1, \dots, t_n) \overline{\mathfrak{P}}_2(t, t_1, \dots, t_n)$$

dar und drückt den der Annahme nach existirenden Theiler $\mathfrak{P}(x, x_1, \dots, x_n)$ durch ein Product aus:

$$g(t, t_1, \dots, t_n) \cdot \overline{\mathfrak{P}}(t, t_1, \dots, t_n),$$

wo g eine ganze Function λ^{ten} Grades in t sei, deren Coefficienten nur Potenzreihen von t_1, t_2, \dots, t_n sind:

$$g(t, t_1, \dots, t_n) = t^\lambda + h_1(t_1, t_2, \dots, t_n) \cdot t^{\lambda-1} + \dots + h_\lambda(t_1, t_2, \dots, t_n)$$

und wo die Potenzreihe $\overline{\mathfrak{P}}(t, t_1, \dots, t_n)$ für $t=t_1=\dots=t_n=0$ nicht verschwindet, so folgt:

$$g_1(t, t_1, \dots, t_n) = g(t, t_1, \dots, t_n) \cdot \frac{\overline{\mathfrak{P}}(t, t_1, \dots, t_n)}{\overline{\mathfrak{P}}_1(t, t_1, \dots, t_n)} \cdot \mathfrak{P}_1^{(1)}(x, x_1, \dots, x_n) =$$

$$= g(t, t_1, \dots, t_n) \cdot \mathfrak{P}_1^{(0)}(t, t_1, \dots, t_n)$$

$$g_2(t, t_1, \dots, t_n) = g(t, t_1, \dots, t_n) \cdot \frac{\overline{\mathfrak{P}}(t, t_1, \dots, t_n)}{\overline{\mathfrak{P}}_2(t, t_1, \dots, t_n)} \cdot \mathfrak{P}_2^{(1)}(x, x_1, \dots, x_n)$$

$$= g(t, t_1, \dots, t_n) \cdot \mathfrak{P}_2^{(0)}(t, t_1, \dots, t_n)$$

und darnach sind g_1 und g_2 durch $g(t, t_1, \dots, t_n)$ theilbar.

Die Bedingung, unter welcher

$$g_1(t, t_1, \dots, t_n) = t^\mu + g_1'(t_1, t_2, \dots, t_n)t^{\mu-1} + \dots + g_\mu'(t_1, \dots, t_n)$$

$$g_2(t, t_1, \dots, t_n) = t^\nu + g_1''(t_1, t_2, \dots, t_n)t^{\nu-1} + \dots + g_\nu''(t_1, \dots, t_n)$$

einen gemeinsamen Theiler $g(t, t_1, \dots, t_n)$ λ^{ten} Grades in t besitzen, besteht aber in dem Verschwinden λ ganzer Functionen der Coefficienten g_1', \dots, g_μ' und $g_1'', g_2'', \dots, g_\nu''$. Man sieht darnach, daß nothwendig mindestens eine Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(t, t_1, t_2, \dots, t_n)$$

identisch verschwinden muß, wenn zwei Potenzreihen \mathfrak{P}_1 und \mathfrak{P}_2 einen gemeinsamen Theiler:

$$g(t, t_1, \dots, t_n) = \mathfrak{P}(t, t_1, \dots, t_n)$$

aufweisen sollen.

Umgekehrt werden unter den in Rede stehenden Bedingungen die Functionen von t :

$$g_1(t, t_1, \dots, t_n), \quad g_2(t, t_1, \dots, t_n)$$

einen gemeinsamen Theiler λ^{ten} Grades haben, dessen Nullstellen $t^{(1)}, t^{(2)} \dots t^{(2)}$ bei hinlänglich beschränktem Bereiche für die Größen t_1, \dots, t_n einen endlichen Betrag besitzen, auf daß in dem Theiler die Coefficienten der t Potenzen convergente Potenzreihen von t_1, t_2, \dots, t_n sind. Heißt der Theiler $g(t, t_1, \dots, t_n)$, so wird

$$g_1(t, t_1, \dots, t_n) = g(t, t_1, \dots, t_n) g_1^{(1)}(t, t_1, \dots, t_n)$$

$$g_2(t, t_1, \dots, t_n) = g(t, t_1, \dots, t_n) g_2^{(1)}(t, t_1, \dots, t_n),$$

wenn $g_1^{(1)}$ und $g_2^{(1)}$ wieder ganze Functionen von t bezeichnen, deren Coefficienten Potenzreihen von $t_1 \dots t_n$ sind. Ferner ist aber:

$$\mathfrak{P}_1(x, x_1, \dots, x_n) = g(t, t_1, \dots, t_n) \mathfrak{P}_1^{(1)}(x, x_1, \dots, x_n)$$

$$\mathfrak{P}_2(x, x_1, \dots, x_n) = g(t, t_1, \dots, t_n) \mathfrak{P}_2^{(1)}(x, x_1, \dots, x_n),$$

und wenn man

$$g(t, t_1, \dots, t_n) = \mathfrak{P}(x, x_1, \dots, x_n)$$

setzt, kann man die gegebenen Potenzreihen auf die Form bringen:

$$\mathfrak{P}(x, x_1, \dots, x_n) \mathfrak{P}_1^{(1)}(x, x_1, \dots, x_n)$$

$$\mathfrak{P}(x, x_1, \dots, x_n) \mathfrak{P}_2^{(1)}(x, x_1, \dots, x_n).$$

Hier besitzen die Potenzreihen $\mathfrak{P}_1^{(1)}$ und $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ keinen gemeinsamen Theiler mehr, denn andernfalls müßten in

$$\mathfrak{P}_1^{(1)}(x, x_1, \dots, x_n) = G_1(t, t_1, \dots, t_n) \overline{\mathfrak{P}}_1^{(1)}(t, t_1, \dots, t_n)$$

$$\mathfrak{P}_2^{(1)}(x, x_1, \dots, x_n) = G_2(t, t_1, \dots, t_n) \overline{\mathfrak{P}}_2^{(1)}(t, t_1, \dots, t_n)$$

die Functionen von t G_1 und G_2 einen gemeinsamen Theiler haben und

dann hätten g_1 und g_2 einen Theiler von höherem als dem λ^{ten} Grade in t , was mit der obigen Annahme in Widerspruch steht.

Die Bedingungen sind somit nicht allein nothwendig, sondern auch hinreichend. —

Ist nunmehr ein Quotient zweier an der Stelle (0) verschwindender Potenzreihen vorgelegt und hat man Zähler und Nenner von den gemeinsamen Theilern befreit, so kann der neue Quotient

$$\frac{\mathfrak{P}_1^{(1)}(x, x_1, \dots x_n)}{\mathfrak{P}_2^{(1)}(x, x_1, \dots x_n)}$$

immer noch eine verschiedenartige Beschaffenheit in der Umgebung der Stelle (0) haben.

Erstens kann $\mathfrak{P}_1^{(1)}(0, 0, \dots 0)$ verschwinden, ohne dafs $\mathfrak{P}_2^{(1)}(0, 0, \dots 0)$ Null ist, oder es kann $\mathfrak{P}_1^{(1)}(0, 0, \dots 0)$ von Null verschieden sein und $\mathfrak{P}_2^{(1)}(0, 0, \dots 0)$ verschwinden oder es haben endlich beide Potenzreihen an der Stelle (0) den Werth Null.

Im zweiten Falle ersetze man $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ durch: $G_2(t, t_1, \dots t_n) \mathfrak{P}_2^{(1)}(t, t_1, \dots t_n)$ oder

$$(t^r + G_1'' t^{r-1} + \dots + G_r'') \overline{\mathfrak{P}}_2^{(1)}(t, t_1, \dots t_n),$$

wo $\overline{\mathfrak{P}}_2^{(1)}(0, 0, \dots 0)$ nicht Null ist, aber die Potenzreihen G'' an der Stelle

$$t_1 = t_2 = \dots = t_n = 0$$

verschwinden. Offenbar gibt es dann in jeder Umgebung der Stelle (0) eine $2n$ -fach ausgedehnte Mannigfaltigkeit von Stellen, wo der Quotient unendlich groß wird, und ebenso wird er an der Stelle (0) selbst unendlich groß. Werthesysteme $(t, t_1, t_2, \dots t_n)$, für die

$$t^r + G_1'' t^{r-1} + \dots + G_r''$$

nicht Null ist, definiren Stellen, in deren Umgebung der Quotient regulären Verhaltens ist. —

Verschwinden aber $\mathfrak{P}_1^{(1)}$ und $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ an der Stelle (0) (ohne dafs $\mathfrak{P}_1^{(1)}$ durch $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ theilbar ist), so gibt es in jeder Umgebung dieser Stelle unendlich viele Werthesysteme, für die $\mathfrak{P}_1^{(1)}$ und $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ verschwinden.

Setzt man wieder

$$\mathfrak{P}_1^{(1)} = G_1 \overline{\mathfrak{P}}_1^{(1)}, \quad \overline{\mathfrak{P}}_2^{(1)} = G_2 \mathfrak{P}_2^{(1)},$$

so muß zwischen den Größen $t_1, t_2, \dots t_n$ eine bestimmte Gleichung:

$$\mathfrak{p}(t_1, t_2, \dots t_n) = 0$$

bestehen, wenn $\mathfrak{P}_1^{(1)}$ und $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ gleichzeitig Null sein sollen. Jeder Lösung derselben gehört eine der besagten Stellen zu. Offenbar gibt es aber auch unendlich viele Stellen in jeder Umgebung der Stelle (0), an denen $\mathfrak{P}_1^{(1)}$ oder $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ verschwindet und $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ respective $\mathfrak{P}_1^{(1)}$ von Null

verschieden sind, d. h. der Quotient kann an unendlich vielen Stellen unendlich groß werden, an anderen aber verschwinden. — Der Quotient hat dann in einer unendlich kleinen Umgebung von (0) überhaupt keinen bestimmten Werth.*)

Ist $n > 1$, gibt es also mehr als zwei Variable, so constituiren die Stellen, für welche $\mathfrak{P}_1^{(1)}$ und $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ verschwinden, eine $(2n - 2)$ fach ausgedehnte Mannigfaltigkeit und an jeder dieser Stellen $(x', x'_1, \dots x'_n)$ hat der Quotient $\frac{\mathfrak{P}_1^{(1)}}{\mathfrak{P}_2^{(1)}}$ wiederum keinen bestimmten Werth.

Dieser letzte Satz beruht darauf, daß die durch die Transformation:

$$x = x' + u, \quad x_1 = x'_1 + u_1, \dots x_n = x'_n + u_n$$

entstehenden Potenzreihen:

$$\mathfrak{P}_1^{(1)}(x' + u, x'_1 + u_1, \dots x'_n + u_n), \quad \mathfrak{P}_2^{(1)}(x' + u, x'_1 + u_1, \dots x'_n + u_n)$$

keinen an der Stelle $u = 0, u_1 = 0, \dots u_n = 0$ verschwindenden gemeinsamen Theiler besitzen, wenn $\mathfrak{P}_1^{(1)}(x, x_1, \dots x_n)$ und $\mathfrak{P}_2^{(1)}(x, x_1, \dots x_n)$ keinen haben.

In der That ist $(x', x'_1, \dots x'_n)$ eine Stelle in der Umgebung von (0), in welcher die Reihen $\mathfrak{P}_1^{(1)}$ und $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ nicht verschwinden, und entspricht derselben die Stelle

$$t = t', \quad t_1 = t'_1, \dots t_n = t'_n,$$

und setzt man

$$t = t' + v, \quad t_1 = t'_1 + v_1, \dots t_n = t'_n + v_n,$$

so wird

$$\begin{aligned} & \mathfrak{P}_1^{(1)}(x' + u, x'_1 + u_1, \dots x'_n + u_n) \\ &= G_1(t' + v, t'_1 + v_1, \dots t'_n + v_n) \overline{\mathfrak{P}_1^{(1)}}(t' + v_1, \dots t'_n + v_n) \\ & \mathfrak{P}_2^{(1)}(x' + u, x'_1 + u_1, \dots x'_n + u_n) \\ &= G_2(t' + v, t'_1 + v_1, \dots t'_n + v_n) \overline{\mathfrak{P}_2^{(1)}}(t' + v_1, \dots t'_n + v_n), \end{aligned}$$

wobei

$$G_1(t', t'_1, \dots t'_n) \quad \text{und} \quad G_2(t', t'_1, \dots t'_n)$$

Null sind. Da aber weder $G_1(t' + v, t'_1 + v_1, \dots t'_n + v_n)$ und $G_2(t' + v, t'_1 + v_1, \dots t'_n + v_n)$ für jeden Werth von v verschwindet, kann man

$$G_1(t' + v, t'_1 + v_1, \dots t'_n + v_n)$$

die Form

$$(v^m + g'_1(v_1, \dots v_n) v^{m-1} + \dots + g'_m(v_1, \dots v_n)) \mathfrak{P}_1^{(2)}(v, v_1, \dots v_n),$$

*) Vergleiche auch § 23.

die Form

$$G_2(t + v, t_1' + v_1, \dots, t_n' + v_n)$$

$(v^n + g_1''(v_1, \dots, v_n)v^{n-1} + \dots + g_n''(v_1, \dots, v_n)) \mathfrak{P}_2^{(3)}(v, v_1, \dots, v_n)$
geben, wo $\mathfrak{P}_1^{(3)}$ und $\mathfrak{P}_2^{(3)}$ an der Stelle $v = v_1 = \dots = v_n = 0$ nicht verschwinden, aber die Reihen g' und g'' für $v_1 = \dots = v_n = 0$ Null werden.

Sollte nun $\mathfrak{P}_1^{(1)}(x' + u, \dots, x_n' + u_n)$ und $\mathfrak{P}_2^{(1)}(x' + u, \dots, x_n' + u_n)$ einen an der Stelle $(u = 0, \dots, u_n = 0)$ verschwindenden Theiler haben, so müßten die Gleichungen $G_1 = 0$ und $G_2 = 0$ für jedes System unendlich kleiner Werthe von v_1, \dots, v_n unendlich kleine Lösungen v haben, und das ist unmöglich, indem sonst die Resultante von

$$G_1(t, t_1, \dots, t_n) \quad \text{und} \quad G_2(t, t_1, \dots, t_n)$$

identisch verschwände, was mit der Annahme nicht verträglich ist, daß $\mathfrak{P}_1^{(1)}$ und $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ keinen gemeinsamen Theiler haben.

§ 70. Über die Darstellung der eindeutigen analytischen Functionen.

Gehen wir wieder zu einer durch ein primitives Element:

$$\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n | a_1, a_2, \dots, a_n) \quad \text{oder} \quad \mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots, x_n | (a))$$

definiten eindeutigen Function $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ zurück, so ist nun klar, daß sich diese Function in der Umgebung einer Stelle $(x_1', x_2', \dots, x_n')$ nur regulär verhalten kann, sofern eine für $x_1 = x_1', \dots, x_n = x_n'$ verschwindende Potenzreihe

$$\mathfrak{P}_2(x_1, x_2, \dots, x_n | (x'))$$

der Beschaffenheit anzugeben ist, daß das Product

$$\mathfrak{P}_2(x_1, x_2, \dots, x_n | (x')) f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

an den Nullstellen von \mathfrak{P}_2 , welche einer endlichen wenn auch noch so kleinen Umgebung von (x') angehören, verschwindet. Setzt man aber

$$\mathfrak{P}_2(x_1, x_2, \dots, x_n | (x')) f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \mathfrak{P}_1(x_1, x_2, \dots, x_n | (x')),$$

wo die Potenzreihe \mathfrak{P}_1 für $x_1 = x_1' \dots x_n = x_n'$ Null ist, und befreit in dem Quotienten $\frac{\mathfrak{P}_1}{\mathfrak{P}_2}$ \mathfrak{P}_1 und \mathfrak{P}_2 von den an der Stelle (x') verschwindenden gemeinsamen Theilern, auf daß $\frac{\mathfrak{P}_1}{\mathfrak{P}_2}$ etwa in $\frac{\mathfrak{P}_1^{(1)}}{\mathfrak{P}_2^{(1)}}$ über-

geht, so muß ferner $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ an der Stelle (x') von Null verschieden sein. Dann und nur dann wird $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ regulären Verhaltens sein.

Wenn aber $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ an der Stelle (x') verschwindet, ohne daß $\mathfrak{P}_1^{(1)}$ daselbst Null ist, so wird $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ an unendlich vielen Stellen einer unendlich kleinen Umgebung von (x') , die eine $(2n - 2)$ fach

ausgedehnte Mannigfaltigkeit bilden und für $(x_1 = x'_1 \dots x_n = x'_n)$ selbst unendlich groß werden.

Ist endlich sowohl $\mathfrak{P}_1^{(1)}$ als auch $\mathfrak{P}_2^{(1)}$ an der Stelle (x') Null, so hat $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ weder in (x') noch an unendlich vielen Stellen einer $(2n - 4)$ fach ausgedehnten Mannigfaltigkeit aus einer unendlich kleinen Umgebung von (x') einen bestimmten Werth. —

Die hier genannten nicht regulären Stellen von $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ heißen *aufserwesentlich singuläre Stellen erster und zweiter Art*. Man definirt also eine solche Stelle (x') dadurch, daß man sagt, es gibt eine an der Stelle (x') verschwindende Potenzreihe \mathfrak{P}_2 derart, daß das Product

$$\mathfrak{P}_2(x_1, \dots, x_n | (x')) f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

in einer Umgebung von (x') regulären Verhaltens, d. h. durch eine Potenzreihe

$$\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n | (x'))$$

darstellbar ist, welche aber nicht durch \mathfrak{P}_2 theilbar ist. —

Im Falle einer Variablen geht diese Definition der aufserwesentlich singulären Stelle gerade in die früher gebrauchte über.

Eine Stelle $(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ heißt eine *wesentlich singuläre*, wenn es keine für $(x_1 = x'_1, \dots, x_n = x'_n)$ verschwindende Potenzreihe der Beschaffenheit gibt, daß das Product derselben und $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ in einer Umgebung von (x') regulär wird. —

Definirt man nun eine analytische Function $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ in dem gemeinsamen Convergencebereiche (\mathfrak{A}) zweier Potenzreihen

$$\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n | (a)), \quad \mathfrak{P}_2(x_1, \dots, x_n | (a))$$

dadurch, daß man an den Stellen (x') , wo diese Reihen nicht gleichzeitig verschwinden,

$$f(x'_1, \dots, x'_n) = \frac{\mathfrak{P}_1(x'_1, \dots, x'_n | (a))}{\mathfrak{P}_2(x'_1, \dots, x'_n | (a))}$$

setzt und an den Stellen (x'') , wo beide Reihen Null sind, $f(x_1, \dots, x_n)$ den Werth gibt, den der Quotient der aus \mathfrak{P}_1 und \mathfrak{P}_2 durch Fortsetzung gewonnenen und von gemeinsamen Theilern befreiten Reihen nach Potenzen von $(x' - x'')$ an der Stelle (x'') besitzt, so ist auf diese Weise in dem Bereiche (\mathfrak{A}) eine eindeutige analytische Function bestimmt, die nur an denjenigen Stellen, wo sie unendlich oder unbestimmt ist, aufserwesentlich singuläre Stellen hat, während sie an den übrigen Stellen regulären Verhaltens ist.

Der Beweis beruht immer wieder auf den Darstellungen der Fortsetzungen von \mathfrak{P}_1 und \mathfrak{P}_2 in der Umgebung einer Nullstelle.

Nach diesem Satze wird eine beständig convergente Potenzreihe $\mathfrak{P}(x_1, \dots, x_n)$ eine eindeutige Function $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ darstellen, die

sich in der Umgebung jeder im Endlichen gelegenen Stelle regulär verhält, und umgekehrt wird jede eindeutige im Endlichen durchaus reguläre Function durch eine beständig convergirende Reihe auszu-
drücken sein:

Der Quotient zweier beständig convergenten Reihen oder ganzen Functionen definirt eine eindeutige Function, die im Endlichen keine wesentlich singuläre Stelle, also höchstens außerwesentlich singuläre hat, an denen sie entweder den bestimmten Werth ∞ oder keinen bestimmten Werth annimmt.

Eine analytische Function, die überall den Charakter einer rationalen Function besitzt, d. h. überall durch den Quotienten zweier Potenzreihen darstellbar ist, ist eine rationale Function ihrer Argumente.

Wir nehmen an, daß dieser Satz für Functionen von $(n - 1)$ Variabeln bewiesen sei und zeigen seine Richtigkeit für eine Function

$$f(x_1, x_2, \dots x_n).^{*)}$$

Dabei wollen wir festsetzen, daß sich unsere Function in der Umgebung der Stelle (0) regulär verhalte, daß also eine Entwicklung bestehe:

$$f(x_1, x_2, \dots x_n) = \mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n) = \sum_{\lambda=0}^{\infty} \mathfrak{P}_{\lambda}(x_2, x_3, \dots x_n) x_1^{\lambda} = \sum_{\lambda=0}^{\infty} A_{\lambda} x_1^{\lambda}$$

und ferner soll $f(x_1, \dots x_n)$ für $(x_1 = 0, x_2 = 0, \dots x_n = 0)$ nicht Null sein.

Ist dann durch die Bedingungen:

$$|x_1| \leq r, \quad |x_2| \leq r, \dots |x_n| \leq r$$

ein Bereich fixirt, für dessen Stellen $\mathfrak{P}(x_1, x_2, \dots x_n)$ auch nicht verschwindet, und gibt man x_n einen bestimmten Werth b_n , dessen absoluter Betrag kleiner ist als r , so wird $f(x_1, x_2, \dots x_{n-1}, b_n)$ eine rationale Function der $(n - 1)$ Argumente $x_1, x_2, \dots x_{n-1}$, denn wenn in der Umgebung einer beliebigen Stelle:

$$x_1 = a_1, \dots x_{n-1} = a_{n-1}, \quad x_n = b_n$$

$$f(x_1, x_2, \dots x_n) = \frac{\sum_{\lambda} C_{\lambda} (x_n - b_n)^{\lambda}}{\sum_{\lambda} C'_{\lambda} (x_n - b_n)^{\lambda}}$$

ist, wo C_{λ} und C'_{λ} Potenzreihen von $(x_1 - a_1), \dots (x_{n-1} - a_{n-1})$ bezeichnen, so wird ja

$$f(x_1, x_2, \dots x_{n-1}, b_n) = \frac{C_0}{C'_0},$$

d. h. $f(x_1, \dots x_{n-1}, b_n)$ ist in der Umgebung jeder Stelle $(a_1, \dots a_{n-1})$ durch den Quotienten zweier Potenzreihen $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots x_{n-1} | (a))$ und

*) Siehe Hurwitz, J. v. Kronecker u. Weierstrass, Bd. 94.

$\mathfrak{P}_0'(x_1, \dots, x_n | (a))$ darstellbar, wenn nur keine der Reihen C_0 und C_0' identisch verschwindet. Das ist aber nicht möglich, weil mit $C_0 = 0$ $f(x_1, \dots, x_{n-1}, b_n)$ in der Umgebung r der Stelle (0) stets Null und mit $C_0' = 0$ stets unendlich groß wäre, was der Voraussetzung widerspricht, derzufolge diese Function in dem genannten Bereiche endlich und von Null verschieden ist.

Es folgt somit:

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, b_n) &= \sum_{\lambda=0}^{\infty} \mathfrak{P}_{\lambda}^{(1)}(x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, b_n) x_1^{\lambda} = \sum_{\lambda=0}^{\infty} A_{\lambda}^{(1)} x_1^{\lambda} \\ &= \frac{G_1(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})}{G_2(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})} = \frac{B_0 + B_1 x_1 + \dots + B_m x_1^m}{B'_0 + B'_1 x_1 + \dots + B'_m x_1^m}, \end{aligned}$$

wo B_{μ} und B'_{μ} ganze rationale Functionen von x_2, x_3, \dots, x_{n-1} sind und eine der Functionen B_m, B'_m von Null verschieden sein möge, so daß eine der ganzen Functionen G_1 und G_2 in x_1 von m^{ten} Grade ist. Setzt man nun

$$G_2(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) \sum_{\lambda=0}^{\infty} A_{\lambda}^{(1)} x_1^{\lambda} = G_1(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$$

und vergleicht die Coefficienten gleicher Potenzen von x_1 , so müssen, wie man leicht sieht, die Determinanten $(m+1)^{\text{ter}}$ Ordnung aus den Reihen:

$$\begin{aligned} A_1^{(1)} A_2^{(1)}, \dots, A_{m+1}^{(1)} \\ A_2^{(1)} A_3^{(1)}, \dots, A_{m+2}^{(1)} \\ A_3^{(1)} A_4^{(1)}, \dots, A_{m+3}^{(1)} \\ \dots \end{aligned}$$

verschwinden. Sucht man dann zu jeder Stelle b_n eines in der Umgebung r von $x_n = 0$ liegenden Bereiches $|x_n| \leq r' < r$ den Grad der zugehörigen Function $f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, b_n)$ in Bezug auf x_1 , so bemerkt man, daß unendlich vielen Stellen x_n derselbe Grad zugehören muß. In jeder Umgebung der Grenzstelle dieser b_n werden deshalb die früheren Determinanten, deren Glieder $A_{\lambda}^{(1)}$ jetzt wieder durch A_{λ} zu ersetzen sind, unabhängig von den Werthen der Variablen x_2, x_3, \dots, x_n d. h. identisch verschwinden. Dann aber lassen sich die unendlich vielen Gleichungen

$$A_{\nu} f_m + A_{\nu+1} f_{m-1} + \dots + A_{\nu+m} f_0 = 0 \quad (\nu = 1, 2, \dots)$$

durch $(m+1)$ in der Umgebung der Stelle $x_2 = 0, \dots, x_n = 0$ reguläre Functionen von x_2, \dots, x_n lösen, die daselbst nicht sämmtlich Null sind.

Indem hiermit

$$\begin{aligned} f(x_1, \dots, x_n) \cdot (f_0 + f_1 x_1 + \dots + f_m x_1^m) &= \sum_{\lambda=1}^{\infty} A_{\lambda} x_1^{\lambda} (f_0 + f_1 x_1 + \dots + f_m x_1^m) \\ &= \varphi_0 + \varphi_1 x_1 + \dots + \varphi_m x_1^m \end{aligned}$$

wird, muß auch

$$f(x_1, \dots, x_n) = \frac{\varphi_0 + \varphi_1 x_1 + \dots + \varphi_m x_1^m}{f_0 + f_1 x_1 + \dots + f_m x_1^m}$$

sein, worin die Größen φ und f in der Umgebung von $x_2 = 0, \dots, x_n = 0$ reguläre Functionen sind.

Gibt man nun x_1 $(2m + 1)$ verschiedene in hinlänglicher Nähe von $x_1 = 0$ liegende Werthe, so erhält man neben

$$f(x_1, \dots, x_n) \cdot (f_0 + f_1 x_1 + \dots + f_m x_1^m) = \varphi_0 + \varphi_1 x_1 + \dots + \varphi_m x_1^m$$

noch $(2m + 1)$ Gleichungen:

$$f(b_1^{(\mu)}, x_2, \dots, x_n) \cdot (f_0 + f_1 b_1^{(\mu)} + \dots + f_m (b_1^{(\mu)})^m) = \varphi_0 + \varphi_1 b_1^{(\mu)} + \dots + \varphi_m (b_1^{(\mu)})^m$$

$$(\mu = 1, 2, \dots, 2m + 1)$$

und wenn man aus allen Gleichungen $f_0, f_1, \dots, f_m, \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_m$ eliminiert, ergibt sich eine lineare Relation in

$$f(x_1, \dots, x_n), f(b_1^{(\mu)}, x_2, \dots, x_n) \text{ und den Größen } x_1, x_1^2, \dots, x_1^m.$$

$f(x_1, \dots, x_n)$ kann darnach als rationale Function von x_1, \dots, x_n dargestellt werden, denn $f(b_1^{(\mu)}, x_2, \dots, x_n)$ sind rationale Functionen von x_2, x_3, \dots, x_n .

In dem Ausnahmefalle, wo die Determinante $(2m + 1)^{\text{ten}}$ Grades dieses Gleichungssystemes bei jedem beliebigen Werthesysteme

$$b_1^{(\mu)} (\mu = 1, 2, \dots, 2m + 1)$$

verschwindet, gehe man auf die Determinanten $(2m)^{\text{ten}}$ Grades, die aus der früheren hervorgehen. Wenn eine derselben von Null verschieden ist, folgt $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ wieder als rationale Function von x_1, \dots, x_n .

Der Satz gilt also allgemein, wie er oben ausgesprochen wurde. —

Erinnern wir uns an den Entwicklungsgang bei der Darstellung einer eindeutigen Function einer Variablen und wollten wir denselben hierher übertragen, so müßten wir zunächst beweisen, daß eine eindeutige analytische Function $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, die in der Umgebung jeder endlichen Stelle durch den Quotienten zweier Potenzreihen darstellbar ist, die also im Endlichen keine wesentlich singuläre Stelle besitzt, immer durch den Quotienten zweier beständig convergenter Potenzreihen dargestellt werden kann.

Man sollte meinen, daß sich dieser Satz beweisen lasse, wenn man eine ganze transcendente Function nicht bloß durch eine beständig convergente Potenzreihe, sondern auch in der Form eines Productes ausdrücken könnte; doch diese Darstellungsform ist nicht ausgeführt, aufser wenn festgesetzt ist, daß die Nullstellen der ganzen Function $G(x_1, x_2, \dots, x_n)$ in ähnlicher Weise zu ordnen sind, wie die einer

Durch Einführung der neuen Größen t_0, t_1, \dots, t_n erhält $G(y, x_1, \dots, x_n)$ in der Umgebung von (b, a_1, \dots, a_n) die Form:

$$t_0 + (t_0, t_1, \dots, t_n)_1 + (t_0, t_1, \dots, t_n)_2 + \dots,$$

wo $(t_0, t_1, \dots, t_n)_\mu$ eine homogene Function μ^{ter} Dimension ist.

Nach dem Satze des § 68 kann man den genannten Ausdruck in der Form

$$(t_0 - \mathfrak{P}_0(t_1, t_2, \dots, t_n)) \overline{\mathfrak{P}}_0(t_0, t_1, \dots, t_n)$$

schreiben, wo $\mathfrak{P}_0(0, 0, \dots, 0)$ verschwindet, indefs $\overline{\mathfrak{P}}_0(0, 0, \dots, 0)$ endlich und von Null verschieden ist.

Setzt man jetzt

$$t_0 = \mathfrak{P}_0(t_1, t_2, \dots, t_n)$$

und löst die früheren Gleichungen nach $y - b, x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n$ auf, so gehen $(n+1)$ für $t_1 = \dots = t_n = 0$ verschwindende Potenzreihen

$$x_\nu - a_\nu = \mathfrak{P}_\nu(t_1, t_2, \dots, t_n) \quad (\nu = 1, 2, \dots, n)$$

$$y - b = \mathfrak{P}_{n+1}(t_1, t_2, \dots, t_n)$$

hervor, welche das durch die gegebene Gleichung definirte Gebilde in der Umgebung von (b, a_1, \dots, a_n) darstellen, solange sie convergiren. Wenn die Determinante

$$\begin{vmatrix} \left(\frac{\partial \mathfrak{P}_1}{\partial t_1}\right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial \mathfrak{P}_n}{\partial t_1}\right)_0 \\ \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial \mathfrak{P}_1}{\partial t_n}\right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial \mathfrak{P}_n}{\partial t_n}\right)_0 \end{vmatrix}$$

nicht verschwindet, kann man die Größen t_1, t_2, \dots, t_n durch Potenzreihen

$$\mathfrak{P}^{(v)}(x_1, \dots, x_n | (a))$$

darstellen und es folgt eine Entwicklung der Form:

$$y - b = \mathfrak{P}(x_1, \dots, x_n | (a)),$$

aber andernfalls ist eine solche Darstellung unmöglich.

Läßt die ganze Function $G(y, x_1, \dots, x_n)$ in der Umgebung ihrer Nullstelle (b, a_1, \dots, a_n) nach Einführung der Bezeichnungen:

$$y - b = \eta, \quad x_\nu - a_\nu = \xi_\nu \quad (\nu = 1, 2, \dots, n)$$

nur die Schreibweise zu:

$$(\eta, \xi_1, \dots, \xi_n)_\mu + (\eta, \xi_1, \dots, \xi_n)_{\mu+1} + \dots = \Phi(\eta, \xi_1, \dots, \xi_n),$$

wo die Glieder niedrigster Dimension von höherer als der ersten Dimension sind, so bedarf man zur Darstellung des irreductiblen algebraischen

Gebildes n^{ter} Stufe mehr als ein Functionensystem der obigen Gestalt, aber doch nur eine endliche Anzahl.

Hat man aber das algebraische Gebilde in der Umgebung jeder Stelle durch Potenzreihen in n Hilfsvariabeln ausgedrückt, so kann man das Verhalten jeder rationalen Function

$$s = R(y, x_1, \dots x_n),$$

die sich wieder auf die Form

$$\frac{f(y, x_1, \dots x_n)}{g(x_1, \dots x_n)}$$

bringen läßt, in der f und g ganze rationale Functionen ihrer Argumente sind, in der Umgebung jeder Stelle des Gebildes beurtheilen, denn man kann sie allgemein in den Quotienten zweier Potenzreihen von $t_1, t_2, \dots t_n$ entwickeln.

Denken wir Zähler und Nenner des Quotienten im Falle der gemeinsamen Nullstelle $t_1 = \dots = t_n = 0$ von gemeinsamen Theilern befreit und behält der Nenner hierbei die Nullstelle, so nenne man die außerwesentlich singuläre Stelle von der μ^{ten} Ordnung, wenn das Glied niedrigster Dimension im Nenner die μ^{te} Dimension besitzt.

Zwischen s und $x_1, x_2, \dots x_n$ besteht eine algebraische Gleichung. Um diese zu erhalten, bilde man das Product

$$\prod_{\mu} (s - R(y^{(\mu)}, x_1, \dots x_n)) = \frac{\Psi(s, x_1, \dots x_n)}{\psi(s, x_1, \dots x_n)},$$

wo $y^{(\mu)}$ die zu einem Werthesysteme $x_1, \dots x_n$ gehörigen Werthe von y sind, und setze

$$\Psi^{(m)}(s, x_1, \dots x_n) = 0.$$

Die Function Ψ ist irreductibel oder die ganzzahlige Potenz einer solchen.

Nehmen wir ein System n rationaler Functionen

$$s_\nu = R_\nu(y, x_1, \dots x_n) \quad (\nu = 1, 2, \dots n)$$

auf und fragen nach den Stellen $(y, x_1, \dots x_n)$, für welche diese Functionen vorgegebene Werthe erhalten, so müssen die Werthe von $x_1, \dots x_n$ den n algebraischen Gleichungen

$$\Psi_\nu(s_\nu, x_1, \dots x_n) = 0 \quad (\nu = 1, 2, \dots n)$$

genügen. Den einer Lösung $x'_1 \dots x'_n$ zugehörigen Werth von y oder die entsprechenden y -Werthe müssen den Gleichungen

$G(y, x_1, \dots x_n) = 0$ und $s_\nu - R_\nu(y, x_1, \dots x_n) = 0 \quad (\nu = 1, 2, \dots n)$ genügen.

Jetzt muß sich zeigen lassen, daß bei gehöriger Zählung der vielfachen Stellen das gegebene System rationaler Functionen jedes Werthe-

system (z_1, \dots, z_n) im Allgemeinen an gleich viel Stellen (x_1, \dots, x_n, y) annimmt*). Die Zahl, welche angibt, an wie viel Stellen ein System von n rationalen Functionen die Werthe z_1, \dots, z_n erhält, heie wieder der *Grad* des Systems.

Die Zählung der vielfachen Stellen z. B. einer Unendlichkeitsstelle vollziehe man nach folgender Definition:

Ist

$$R_\nu(y, x_1, \dots, x_n)$$

in der Umgebung einer Stelle (x', x'_1, \dots, x'_n) des Gebildes in der Form

$$\frac{\mathfrak{P}_\nu^{(1)}(t_1, \dots, t_n)}{\mathfrak{P}_\nu^{(2)}(t_1, \dots, t_n)}$$

darstellbar und verschwinden alle n Potenzreihen $\mathfrak{P}_\nu^{(2)}$ an der Stelle (0), die Reihen $\mathfrak{P}_\nu^{(1)}$ aber nicht, so heie das Functionensystem R_1, \dots, R_n von der μ^{ten} Ordnung unendlich, wenn die Determinante

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial \mathfrak{P}_1^{(2)}}{\partial t_1} & \dots & \frac{\partial \mathfrak{P}_n^{(2)}}{\partial t_1} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \mathfrak{P}_1^{(2)}}{\partial t_n} & \dots & \frac{\partial \mathfrak{P}_n^{(2)}}{\partial t_n} \end{vmatrix}$$

in eine Potenzreihe zu entwickeln ist, die mit Gliedern der $(\mu - 1)^{\text{ten}}$ Dimension beginnt.

Existirt kein System rationaler Functionen, welches nur ϱ Unendlichkeitsstellen erster Ordnung besitzt, gibt es aber Functionensysteme, die an $(\varrho + 1)$ beliebig gewählten Stellen von der ersten Ordnung unendlich werden, so nenne man ϱ wieder den *Rang* der algebraischen Gleichung $G = 0$.

Liegen $(n + 1)$ rationale Functionen

$\xi_\nu = R_\nu(y, x_1, \dots, x_n)$, ($\nu = 1, 2, \dots, n$) und $\eta = R_{n+1}(y, x_1, \dots, x_n)$ vor, die $(n + 1)$ verschiedene Systeme der früheren Art constituiren, und deren Grade

$$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{n+1}$$

heißen mögen, so gehören zu einem Werthesystem $\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n$ der

*) Im Falle eines Gebildes höherer als erster Stufe kann es nämlich Mannigfaltigkeiten von Stellen (y, x_1, \dots, x_n) geben, für die alle rationalen Functionen unbestimmt werden und darum ist oben die Beschränkung durch den Zusatz „im Allgemeinen“ nothwendig.

ersten n rationalen Functionen vom Grade μ_1, μ_1 Werthesysteme y, x_1, \dots, x_n und μ_1 Werthe η , die aus einer Gleichung

$$\Gamma(\eta, \xi_1, \dots, \xi_n) = 0$$

hervorgehen.

Diese Gleichung ist die Transformirte der gegebenen. Man kann sie umgekehrt in die letztere transformiren, wenn nur einmal einem Werthesysteme ξ_1, \dots, ξ_n μ_1 verschiedene Lösungen η entsprechen, oder wenn bei der Bildung des Productes

$$\prod_i (\eta - R_{n+1}(y^{(i)}, x_1^{(i)}, \dots, x_n^{(i)})) = \frac{\Psi_{n+1}(\eta, \xi_1, \dots, \xi_n)}{\Psi_{n+1}(\xi_1, \dots, \xi_n)},$$

wo $x_1^{(i)}, \dots, x_n^{(i)}, y^{(i)}$ die zu ξ_1, \dots, ξ_n gehörendem Werthesysteme x_1, \dots, x_n, y bezeichnen, Ψ_{n+1} irreductibel und nicht die ganzzahlige Potenz einer irreductiblen Function ist.

Die durch die algebraischen Gleichungen

$$G(y, x_1, \dots, x_n) = 0 \quad \text{und} \quad \Gamma(\eta, \xi_1, \dots, \xi_n) = 0$$

definirten Gebilde n^{ter} Stufe im Gebiete von $(n+1)$ Größen, deren Stellen (wieder nur im Allgemeinen) einander wechselseitig entsprechen, rechnet man zu einer Klasse und deren charakteristische Zahl ist der früher definirte Rang ρ , denn dieser ist für jedes Individuum der Klasse derselbe.

Nach diesen Definitionen ist ersichtlich, wie man wieder die Monogenität des irreductiblen Gebildes zu beweisen hat.

Es entsteht nun auch die Frage, ob die algebraischen Gebilde n^{ter} Stufe im Gebiete von $n+1$ Größen durch eindeutige transcendente Functionen von n unabhängigen Variablen x_1, \dots, x_n zu lösen sind, d. h. ob man x_1, \dots, x_n, y als eindeutige Functionen von n Variablen u_1, \dots, u_n betrachten kann:

$$x_\nu = f_\nu(u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (\nu = 1, 2, \dots, n), \quad y = f_{n+1}(u_1, u_2, \dots, u_n),$$

die in der vorgegebenen algebraischen Beziehung stehen.

Es ist zu vermuthen, daß die Gleichungen $G(y, x_1, \dots, x_n) = 0$ ersten Ranges durch $2n$ fach periodische Functionen zu lösen sind, die im Endlichen keine wesentlich singuläre Stelle besitzen*). Hier ist unter einer $2n$ fach periodischen Function $f(u_1, u_2, \dots, u_n)$ eine Function der Beschaffenheit verstanden, daß für $2n$ Systeme constanter Größen

$$(P_1^{(\lambda)}, P_2^{(\lambda)}, \dots, P_n^{(\lambda)}) \quad (\lambda = 1, 2, \dots, 2n)$$

*) Vergleiche die Sätze von Weierstrass „über die $2n$ fach periodischen Functionen von n Variablen“ in dem Journal für reine und angewandte Math. Bd. 89.

bei beliebigen Werthen von $u_1, u_2, \dots u_n$ die Gleichungen

$$f(u_1 + P_1^{(\lambda)}, u_2 + P_2^{(\lambda)}, \dots u_n + P_n^{(\lambda)}) = f(u_1, u_2, \dots u_n) \\ (\lambda = 1, 2, \dots 2n)$$

und ferner die Relationen:

$$f(u_1 + \sum_{\lambda=1}^{2n} m_\lambda P_1^{(\lambda)}, \dots u_n + \sum_{\lambda=1}^{2n} m_\lambda P_n^{(\lambda)}) = f(u_1, \dots u_n)$$

bestehen, wo $m_1, m_2, \dots m_{2n}$ willkürliche ganze Zahlen bezeichnen.

Andrerseits hat man zu erwarten, daß die Gleichungen höheren als des ersten Ranges durch Functionen zu lösen sind, welche bei derselben Gruppe linearer Substitutionen ungeändert bleiben, die aus einer endlichen Anzahl r von Fundamentalsubstitutionen

$$\left(u_\nu, \frac{\alpha_{\nu 1}^{(p)} u_1 + \alpha_{\nu 2}^{(p)} u_2 + \dots + \alpha_{\nu n}^{(p)} u_n + \alpha_{\nu, n+1}^{(p)}}{\alpha_{n+1, 1}^{(p)} u_1 + \alpha_{n+1, 2}^{(p)} u_2 + \dots + \alpha_{n+1, n}^{(p)} u_n + \alpha_{n+1, n+1}^{(p)}} \right) \\ \nu = 1, 2, \dots n, \quad p = 1, 2, \dots r$$

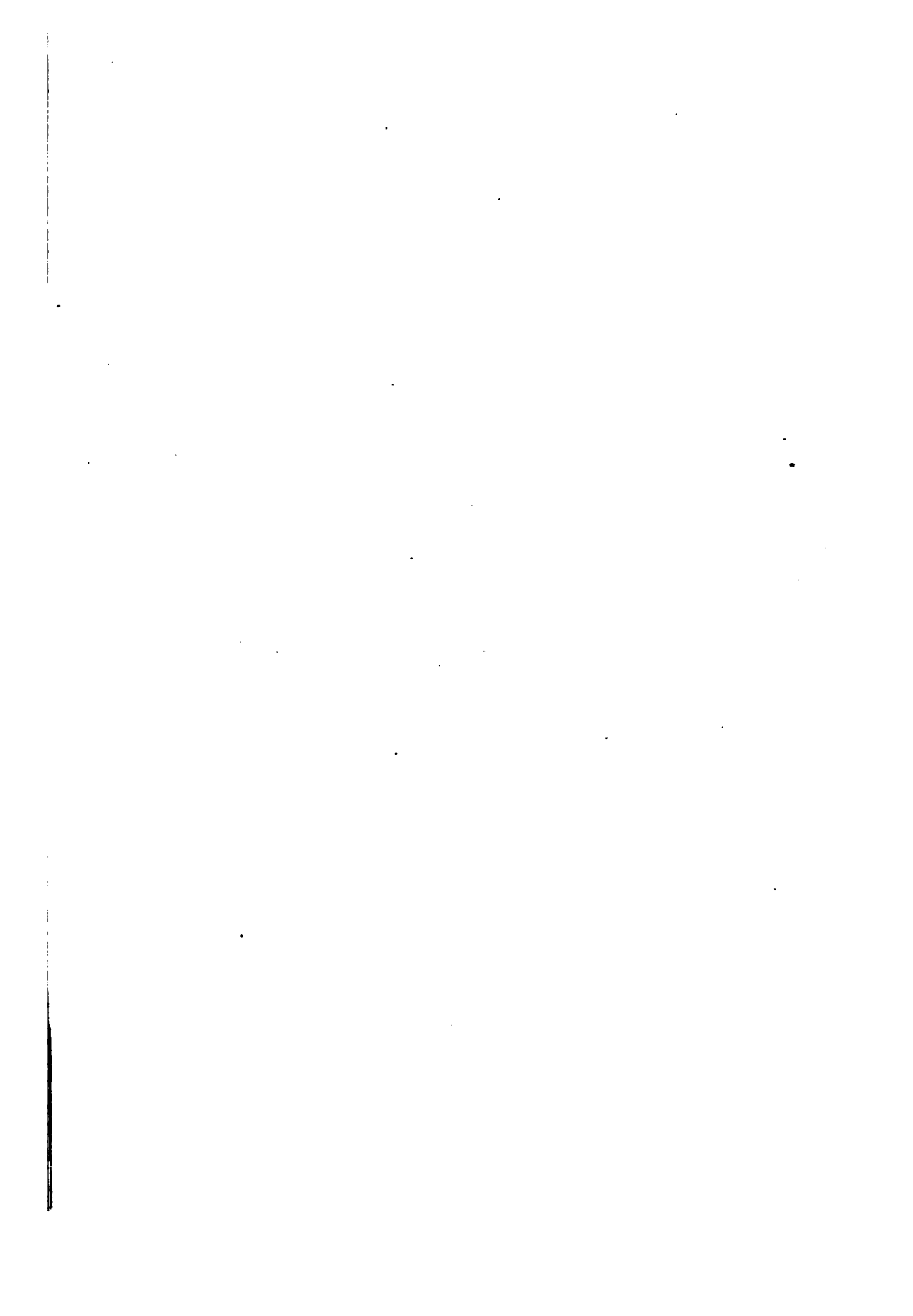
zusammensetzen sind*).

*) Siehe die Abhandlungen von Picard in dem 1. und 5. Bande der Acta mathematica.

Verzeichnis bemerkter Druckfehler.

- S. 9 Z. 11 v. o. statt „wie sich die“ lies „wie sich für die“; Z. 13 v. u. statt $n(\text{mmal})$ lies $(n\text{mal})$.
 S. 45 Z. 15 v. o. lies „erfüllen“ statt „erfülle“.
 S. 47 Z. 6 v. o. lies $i^2 + e^2 = 0$.
 S. 58 Z. 11 v. o. ist das Wort „nie“ zu streichen.
 S. 60 Z. 16 u. 17 v. o. lies „großem“ und „kleinem“.
 S. 66 Z. 18 v. o. lies r statt x .
 S. 67 Z. 7 v. u. lies $|x_2 - x_1|$ statt $|x_2 - x_0|$.
 S. 102 Z. 1 v. u. ist ganz zu streichen.
 S. 109 Z. 3 v. u. lies x_ν statt x_n .
 S. 115 Z. 12 v. o. lies $|f((a))| - \delta$ statt $|f((x))| - \delta$.
 S. 129 Z. 11 v. u. lies $\prod_{\nu=1}^n (\xi_\mu - \xi_{m+\nu})$ statt $\prod_{\nu=1}^n (\xi_\mu - \xi_{m-\nu})$.
 S. 141 Z. 5 v. o. lies „wichtigen“ statt „richtigen“.
 S. 144 Z. 5 v. u. lies δ_m statt d_m .
 S. 149 Z. 1 v. o. lies „den“ statt „denselben“.
 S. 161 Z. 11 v. o. lies $\frac{(x_n - x_n^{(0)})^{\mu_n}}{\mu_n!}$ statt $\frac{(x - x_n^{(0)})^{\mu_n}}{\mu_n}$.

- S. 162 Z. 11 v. u. lies $a_2 - a_1 + (x - a_2)$ statt $a_2 - a_1 + (x - a)$.
- S. 187 Z. 8 v. o. lies $p_{n-2}(x|x_0)$ statt $p(x|x_0)$; Z. 9 v. o. $p_{n-2}(c|x_0)$ statt $p(c|x)$.
- S. 187 Z. 10 v. o. schalte nach dem Worte „Potenzreihen“ „ $p(x|x_0)$ “ ein.
- S. 194 Z. 4 v. u. lies $y^{m-\mu}y'^{\mu-1}$ statt $y^{m\mu}y'^{\mu-1}$.
- S. 219 Z. 8 v. u. lies „von $g_1, \frac{\partial g_1}{\partial \xi_1}$ und“ statt „von $\frac{\partial g_1}{\partial \xi_1}$ und“.
- S. 220 Z. 1, 2, 3 v. o. lies rechts von den Gleichheitszeichen ξ_v statt ξ ; Z. 3 v. u. lies $R(\xi_v, \eta_v)$ statt $R(\xi_v)$; Z. 4 v. u. lies $\bar{\psi}_v$ statt $\bar{\varphi}$.
- S. 222 Z. 5 v. u. lies „endlichen“ statt „unendlichen“.
- S. 223 Z. 9 v. o. lies $y^n - A \prod_{k=1}^n (x - a_k)^{n_k} = 0$.
- S. 225 Z. 12 v. o. lies $\psi, \psi_1, \dots, \psi_n$ statt $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m$.
- S. 226 Z. 13 v. o. schalte nach dem Worte „Grad“ „ k “ ein.
- S. 240 Z. 14 v. u. lies α_μ statt a_μ .
- S. 252 Z. 3, 10, 12 v. u. lies $F_v^{(x)}$ statt $F_v^{(1)}$.
- S. 261 Z. 2 u. 5 lies $\mathfrak{P}(x)$ statt $\mathfrak{P}_x(x)$.
- S. 272 Z. 18 v. o. ist das Wort „Gleichung“ zu streichen.
- S. 278 Z. 13 v. u. lies $\frac{\alpha}{|\alpha|}$ statt $\frac{a}{|\alpha|}$.
- S. 289 Z. 1 v. u. lies c_{v+2} statt a_{v+2} .
- S. 290 Z. 15 v. o. lies $\frac{x - x_0}{x_0}$ statt $\frac{x - a}{x_0}$; Z. 2 v. u. lies c_μ statt c^μ .
- S. 296 Z. 5 v. o. lies $-\frac{i}{y} + 1$ statt $-\frac{1}{y} + 1$.
- S. 297 Z. 11 v. u. lies $\cos nx + i \sin nx$ statt $\cos nx + i \sin x$; Z. 10 v. u. lies $\cos nx - i \sin nx$ statt $\cos nx - i \sin x$.
- S. 298 Z. 8 v. o. lies „ $\cos x$ und $\sin x$ “ statt „ $\cos x$ und $\sin nx$ “.
- S. 300 Z. 9 v. o. lies $(n^2 - 3^2)$ statt $(x^2 - 3^2)$.
- S. 306 Z. 2 v. u. lies $\left(1 + \frac{x}{2}\right)^x$ und $\left(1 + \frac{x}{n}\right)^x$ statt $\left(1 + \frac{x}{2}\right)^{2x}$ und $\left(1 + \frac{x}{n}\right)^{nx}$.
- S. 309 Z. 6 v. o. lies wann statt wenn; Z. 2 v. u. lies $(v = n + 1, n + 2, \dots)$ statt $(v = 1, n + 2, \dots)$.
- S. 333 Z. 18 v. o. lies \widetilde{w} statt w u. Z. 6 v. u. lies \widetilde{w} statt ϖ .
- S. 338 Z. 3 v. o. lies $\cotg \pi \mu' \frac{\omega'}{\omega}$.
- S. 389 lies statt § 61 § 62.
- S. 394 lies statt § 61 § 63.





This book should be returned to
the Library on or before the last date
stamped below.

A fine of five cents a day is incurred
by retaining it beyond the specified
time.

Please return promptly.

MAR 12 1916

Cancelled
MAY 7TH

3029964

4029577

FEB 4 1924